

Grado en Ingeniería mecánica  
2016-2017

*Trabajo Fin de Grado*

---

“Diseño y análisis por el método de los elementos finitos de un cuadro rígido para bicicleta de montaña”

---

Autor

Pablo Rodríguez Torres

Tutora

Carolina Álvarez Caldas

Leganés 2017



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**

## **RESUMEN**

---

En el presente proyecto se tratará la modelización y análisis de dos diseños de cuadros de bicicleta. En concreto, los cuadros a diseñar y analizar son cuadros para bicicleta de montaña rígidos.

Para llevar a cabo el proyecto se utilizarán herramientas de modelado y simulación cada vez más presentes en la ingeniería, y que facilitan el estudio del producto antes de la realización del prototipo consiguiendo disminuir el tiempo de fabricación y abaratando costes.

En cuanto a la elaboración del proyecto se tratará de conocer, en primer lugar, la evolución de los cuadros hasta la actualidad, las modalidades de ciclismo de montaña que existen y las características de los cuadros utilizados en cada una, los materiales utilizados en la fabricación de los cuadros, y, por último, las técnicas de fabricación. Una vez recopilada dicha información, se utilizará para desarrollar los diseños y realizar los análisis correspondientes.

En segundo lugar, se estudiarán los parámetros geométricos que influyen en el diseño del cuadro y se detallarán las características requeridas de los modelos. Los cuadros a realizar son un cuadro que simula la fabricación mediante tubos soldados y otro que simula una configuración monocasco, es decir, fabricado en una única pieza.

Por último, una vez realizados los diseños, se procederá a aplicar la normativa vigente para ensayarlos. Esto se realizará con el fin de comparar los modelos entre sí y con otros similares.

## **ABSTRACT**

---

This project will deal with the modeling and analysis of two designs of bicycle frames, using the well-known, finite element method. Particularly, the frames to be designed and analyzed are made for hardtail mountain bicycles.

To carry out the project will be used modeling and simulation tools that are widely used in engineering nowadays, and that make easier the study of the product before the manufacturing of the prototype, reducing time and costs of prototyping process.

In order to prepare the project, it will be necessary to know, first of all, the evolution of the bicycle frames up to the present time, the different modalities of mountain biking that are practiced and the characteristics of the frames used in each one of them. It is also important to study which materials are used in the manufacturing process of the frames, and the techniques used on them. Once this information has been collected, it will be put into practice to develop the designs and perform the proper analyzes.

Secondly, we will study the geometric parameters applied in the bicycles frames and will be detailed the characteristics required for them. One of the frames will be designed by simulating that it has been made with welded pipes, and the other model simulates a monocoque configuration, that is, made in a single piece.

Finally, once the designs have been made, we will apply the current regulations to test both frames. The aim of these tests is to compare both frames with each other and with similar models that bicycles brands show on their product catalogues.

# ÍNDICE DEL PROYECTO

---

<b>RESUMEN.....</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>II</b>
<b>ÍNDICE DEL PROYECTO.....</b>	<b>III</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>VII</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Entorno socio-económico .....	1
1.2. Motivación .....	3
1.3. Estructura del proyecto .....	4
<b>2. OBJETIVOS DEL PROYECTO .....</b>	<b>5</b>
<b>3. ANTECEDENTES .....</b>	<b>6</b>
3.1. Historia de la bicicleta de montaña .....	6
3.2. Definiciones .....	9
3.2.1. Componentes de la bicicleta.....	9
3.2.2. Modalidades y categorías del ciclismo de montaña .....	13
3.3. Tecnologías .....	17
3.3.1. Tipos de direcciones.....	17
3.3.2. Tipos de caja de pedalier.....	18
3.3.3. Tipos de ejes de rueda .....	20
3.3.4. Tipos de desviador delantero.....	21
3.4. Materiales.....	22
3.4.1. Acero.....	23
3.4.2. Titanio.....	24
3.4.3. Aluminio.....	25
3.4.4. Compuestos de fibra de carbono .....	26
3.4.5. Fibra de basalto.....	28
3.4.6. Grafeno .....	28
3.5. Técnicas de fabricación .....	29
3.5.1. Fabricación con tubos soldados.....	29
3.5.2. Fabricación con materiales compuestos de fibras .....	32
3.5.3. Fabricación mediante deposición aditiva de material .....	33
3.6. Marco regulador .....	36
<b>4. MODELADO.....</b>	<b>37</b>
4.1. Geometría .....	37

4.1.1.	Biomecánica .....	37
4.1.2.	Aspectos clave de diseño .....	38
4.1.3.	Modelos de cuadros .....	44
4.2.	Diseño de los modelos a ensayar .....	45
4.2.1.	Modelo fabricado con tubos de aluminio soldados.....	47
4.2.2.	Modelo fabricado en monocasco de aluminio. ....	50
<b>5.</b>	<b>ANÁLISIS.....</b>	<b>54</b>
5.1.	Ensayos propuestos por la normativa .....	54
5.1.1.	Ensayo de fatiga por fuerzas horizontales .....	57
5.1.2.	Ensayo de fatiga con una fuerza vertical .....	60
5.1.3.	Ensayo de fatiga con fuerzas de pedaleo .....	62
5.2.	Resultados de los ensayos mediante elementos finitos .....	65
5.2.1.	Modelo fabricado con tubos de aluminio soldados.....	65
5.2.2.	Modelo fabricado en monocasco de aluminio .....	69
<b>6.</b>	<b>COMPARACIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>74</b>
<b>7.</b>	<b>PRESUPUESTO.....</b>	<b>75</b>
7.1.	Presupuesto de elaboración del proyecto .....	75
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>76</b>
<b>9.</b>	<b>TRABAJOS FUTUROS.....</b>	<b>77</b>
<b>10.</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>78</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Datos de venta de bicicletas en los últimos cuatro años. [1] .....	1
Figura 1.2. Volumen de ventas de bicicletas por modalidad y precio medio. [1].....	2
Figura 1.3. Incremento de empleo en el sector de la bicicleta en 2016. [1] .....	2
Figura 1.4. Specialized Epic Hardtail Pro Carbon World Cup. [2].....	3
Figura 1.5. Specialized S-Works Demo 8. [3].....	3
Figura 3.1. Safety Bicicle de J. K. Starley. [4] .....	6
Figura 3.2. Celerífero de Sivrac. [5] .....	6
Figura 3.3. Woodsy de J. F. Scott. [6] .....	7
Figura 3.4. Bicicleta con cuadro de cromoly, de Joe Breeze. [7] .....	7
Figura 3.5. Cuadro con láminas de grafeno de Dassi Bikes. [9] .....	8
Figura 3.6. Tubos de un cuadro de bicicleta. [11].....	9
Figura 3.7. Dirección FSA Orbit 1.5 ZS 1.1/8. [13] .....	10
Figura 3.8. Conjunto manillar-potencia-dirección. [14] .....	11
Figura 3.9. Conjunto de transmisión. [11].....	11
Figura 3.10. Mondraker Summun 2017. [16].....	13
Figura 3.11. Niner RIP 9 RDO 5-STAR X01 EAGLE 29 ENVE 2017. [17].....	14
Figura 3.12. Cannondale Habit 6 2017. [18].....	14
Figura 3.13. BMC Teamelite 01 XTR Di2 2017. [11] .....	15
Figura 3.14. Scott Spark RC 900 SL 2017. [19] .....	16
Figura 3.15. Dirección tapered. [12].....	17
Figura 3.16. Tipos de direcciones estandarizadas, S.H.I.S. [20] .....	18
Figura 3.17. Eje pedalier tipo cuadradillo. [22] .....	19
Figura 3.18. Eje pedalier tipo hollowtech. [22].....	19
Figura 3.19. Eje pedalier tipo BB30. [21].....	20
Figura 3.20. Eje pedalier tipo PF30. [21].....	20
Figura 3.21. Eje QR o cierre rápido. [25].....	21
Figura 3.22. Eje boost. [26].....	21
Figura 3.23. Desviador delantero tipo E. [27] .....	22
Figura 3.24. Desviador delantero tipo Direct Mount. [27] .....	22
Figura 3.25. Comparación de materiales según peso y rigidez. [28] .....	23
Figura 3.26. Cuadro de titanio impreso en 3d. [31] .....	25
Figura 3.27. Piezas del cuadro de titanio impreso en 3d. [32] .....	25
Figura 3.28. Bicicleta Racormance fibras de basalto y carbono. [36] .....	28
Figura 3.29. Proceso de hidroconformado. [38] .....	30
Figura 3.30. Dispositivo de soldadura TIG. [33] .....	31
Figura 3.31. Preforma cuadro de carbono Scott. [39].....	32
Figura 3.32. Molde cuadro de darbono Scott. [39] .....	33
Figura 3.33. Racor de fibra de carbono. [40].....	33
Figura 4.1. Medidas biomecánicas para seleccionar la talla de bicicleta. [52] .....	38
Figura 4.2. Ángulo de dirección. [53].....	38
Figura 4.3. Ángulo del sillín. [54].....	39
Figura 4.4. Longitud de las vainas. [55] .....	40
Figura 4.5. Viga en voladizo.....	40
Figura 4.6. Medidas de reach y stack. [56].....	41
Figura 4.7. Altura del eje de pedalier. [58].....	42
Figura 4.8. Batalla o longitud entre ejes. [59] .....	42
Figura 4.9. Medida del offset. [60].....	43
Figura 4.10. Medida del trail. [60].....	43

Figura 4.11. Modelo con tubos de aluminio soldado. Vista de perfil. ....	47
Figura 4.12. Modelo con tubos de aluminio soldado. Vista isométrica. ....	48
Figura 4.13. Detalle de la unión tubo superior-inferior-de dirección. Modelo tubos. ....	48
Figura 4.14. Detalle del conjunto caja de pedalier. Modelo tubos.....	49
Figura 4.15. Detalle de la unión tirantes-tubo superior-tubo de sillín. Modelo tubos....	49
Figura 4.16. Detalle tubo de unión de vainas y tirantes. Modelo tubos.....	50
Figura 4.17. Modelo en aluminio monocasco. Vista de perfil.....	50
Figura 4.18. Modelo en aluminio monocasco. Vista isométrica. ....	51
Figura 4.19. Detalle conjunto de dirección. Modelo monocasco.....	51
Figura 4.20. Detalle caja de pedalier. Modelo monocasco. ....	52
Figura 4.21. Detalle de la unión tirantes-superior-tubo de sillín. Modelo monocasco. .	52
Figura 4.22. Detalle unión vaina-tirante. Modelo monocasco. ....	53
Figura 5.1. Diagrama de criterios de fatiga. [61].....	55
Figura 5.2. Diagrama de Goodman en ANSYS.....	55
Figura 5.3. Curvas S-N de distintos aluminios. [62].....	55
Figura 5.4. Ensayo de fatiga por fuerzas horizontales. Conjunto cuadro-horquilla. ....	57
Figura 5.5. Ensayo de fatiga con fuerzas horizontales, aplicando falsa horquilla. ....	58
Figura 5.6. Ensayo de fatiga con fuerzas horizontales, aplicando fuerza remota. ....	59
Figura 5.7. Ensayo de fatiga con fuerzas horizontales. ANSYS. ....	59
Figura 5.8. Ensayo de fatiga con una fuerza vertical. Conjunto de ensayo. ....	60
Figura 5.9. Ensayo de fatiga con fuerzas verticales. ANSYS. ....	61
Figura 5.10. Ensayo de fatiga con fuerzas de pedaleo.....	63
Figura 5.11. Ensayo de fatiga con fuerzas de pedaleo. ANSYS.....	64
Figura 5.12. Tensión equivalente de Von Mises. Ensayo con fuerzas horizontales.....	65
Figura 5.13. Ciclos de vida. Ensayo con fuerzas horizontales.....	65
Figura 5.14. Factor de seguridad a fatiga. Ensayo con fuerzas horizontales.....	66
Figura 5.15. Tensión equivalente de Von Mises. Ensayo con fuerzas verticales.....	66
Figura 5.16. Ciclos de vida. Ensayo con fuerzas verticales.....	67
Figura 5.17. Factor de seguridad a fatiga. Ensayo con fuerzas verticales.....	67
Figura 5.18. Tensión equivalente de Von Mises. Ensayo con fuerzas de pedaleo. ....	68
Figura 5.19. Ciclos de vida. Ensayo con fuerzas de pedaleo. ....	68
Figura 5.20. Factor de seguridad a fatiga. Ensayo con fuerzas de pedaleo. ....	68
Figura 5.21. Tensión equivalente de Von Mises. Ensayo con fuerzas horizontales.....	69
Figura 5.22. Ciclos de vida. Ensayo con fuerzas horizontales.....	70
Figura 5.23. Factor de seguridad a fatiga. Ensayo con fuerzas horizontales.....	70
Figura 5.24. Tensión equivalente de Von Mises. Ensayo con fuerzas verticales.....	71
Figura 5.25. Ciclos de vida. Ensayo con fuerzas verticales.....	71
Figura 5.26. Factor de seguridad a fatiga. Ensayo con fuerzas verticales.....	71
Figura 5.27. Tensión equivalente de Von Mises. Ensayo con fuerzas de pedaleo. ....	72
Figura 5.28. Ciclos de vida. Ensayo con fuerzas de pedaleo. ....	72
Figura 5.29. Factor de seguridad a fatiga. Ensayo con fuerzas de pedaleo. ....	73

## **ÍNDICE DE TABLAS**

---

Tabla 3.1. Tubos de un cuadro de bicicleta.....	9
Tabla 3.2. Conjunto de transmisión.....	12
Tabla 4.1. Medidas y características de los modelos de referencia.....	44
Tabla 4.2. Medidas y características de los modelos diseñados. ....	46
Tabla 5.1. Propiedades del aluminio. ....	56
Tabla 5.2. Ensayo de fatiga por fuerzas horizontales. Fuerzas y ciclos.....	57
Tabla 5.3. Ensayo de fatiga con una fuerza vertical. Fuerza sobre la tija del sillín. ....	60
Tabla 5.4. Ensayo de fatiga con fuerzas de pedaleo. Fuerzas en eje del pedal. ....	62
Tabla 5.5. Verificación de requisitos. Ensayo con fuerzas horizontales.....	66
Tabla 5.6. Verificación de requisitos. Ensayo con fuerzas verticales.....	67
Tabla 5.7. Verificación de requisitos. Ensayo con fuerzas de pedaleo. ....	69
Tabla 5.8. Verificación de requisitos. Ensayo con fuerzas horizontales.....	70
Tabla 5.9. Verificación de requisitos. Ensayo con fuerzas verticales.....	72
Tabla 5.10. Verificación de requisitos. Ensayo con fuerzas de pedaleo. ....	73
Tabla 7.1. Presupuesto de elaboración del proyecto.....	75





# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Entorno socio-económico

El presente proyecto se encuentra directamente relacionado con el sector de la bicicleta y su industria. Este sector recoge los ámbitos empresariales relacionados con la fabricación, distribución y comercialización de productos en la práctica del ciclismo, tanto a nivel de ocio y tiempo libre, como a nivel de competición, y en los últimos años, como medio de transporte.

De acuerdo con los datos estadísticos mostrados por AMBE [1] (asociación de marcas y bicicletas de España) de 2016, se indica que en ese año se han creado 56 nuevas empresas de un total de 393 en el sector, esto supone un incremento en el número de empresas operando en el sector, de un 16% en los últimos cinco años. A nivel global, el mayor número de marcas del sector se encuentra en Europa, con un 65,67% de un total de 1036 marcas, seguida de América con un 22,63%. A nivel nacional, el 80% de las empresas se encuentran en cuatro comunidades, País Vasco (9%), Comunidad Valenciana (9%), Comunidad de Madrid (18%), y Cataluña (45%).

Las ventas del sector de artículos deportivos se han visto incrementadas en un 5,76% respecto a 2015 de las cuales el 23,49% corresponden a las ventas en el mercado de la bicicleta, siendo el mayor porcentaje por encima de deportes mayoritarios como el fútbol. En el gráfico mostrado en la Figura 1.1 se puede apreciar el crecimiento de las ventas en el sector de la bicicleta en los últimos 4 años. El mayor porcentaje de ventas se alcanza en tiendas especializadas con un 78,6% frente a cadenas multideportivas y grandes superficies.

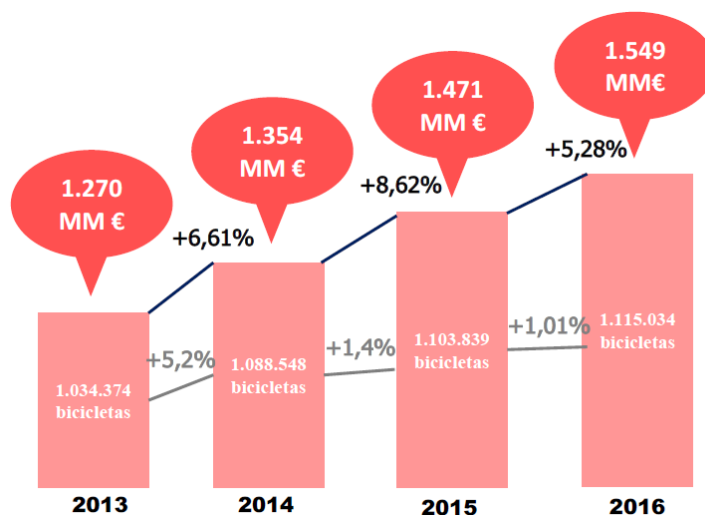


Figura 1.1. Datos de venta de bicicletas en los últimos cuatro años. [1]

En cuanto al producto, el estudio realizado por AMBE muestra un crecimiento en las ventas de bicicletas completas de un 1,5% de 2015 a 2016. Siendo las bicicletas completas el producto que más se vende con un 43,86% del total frente a componentes (33,89%), cascos (4,23%) y otros (18,02%), como calzado, textil o herramientas. En el gráfico de la Figura 1.2 se observa el volumen de ventas por modalidad y precio medio, donde las bicicletas de montaña son el producto que más ventas genera.

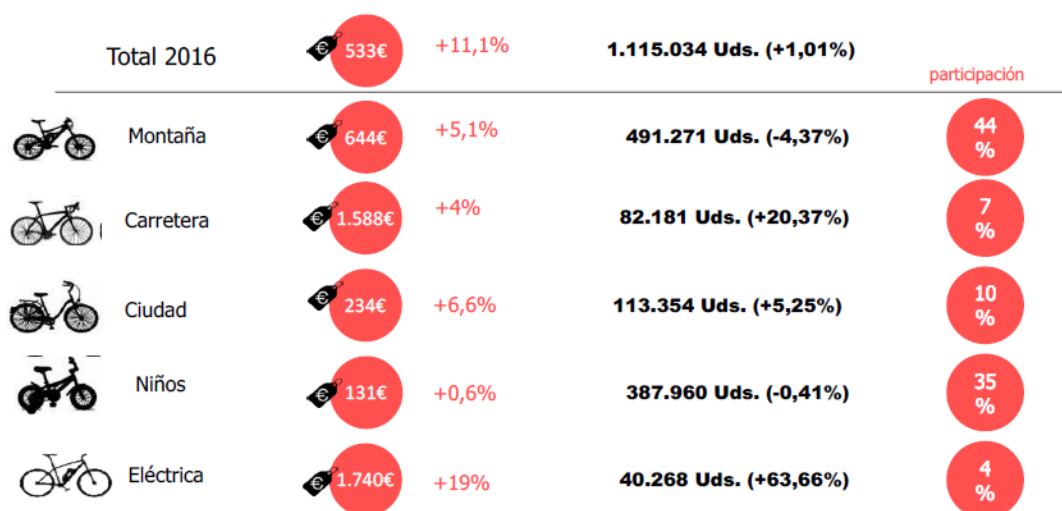


Figura 1.2. Volumen de ventas de bicicletas por modalidad y precio medio. [1]

Otro dato que muestra que el sector de la bicicleta es un sector que está experimentando un crecimiento en los últimos años, es el empleo generado en 2016 que, en el total del sector, supone un aumento del 10,64% frente al año 2015. En la Figura 1.3 se muestran las cifras que se han incrementado de 2015 a 2016. En 2016, el sector de la bicicleta comprende un total de 20843 trabajadores, de los cuales 8375 pertenecen a empresas y 12468 a comercios del sector.



Figura 1.3. Incremento de empleo en el sector de la bicicleta en 2016. [1]

Este crecimiento puede ser debido a la concienciación actual sobre el respeto al medio ambiente, haciendo que cada vez más usuarios utilicen la bicicleta como medio de transporte limpio, en vez de vehículos contaminantes. A raíz de darle este uso a las dos ruedas gran cantidad de usuarios se han visto atraídos por la idea y han decidido utilizar la bicicleta en su tiempo libre como ocio.

El proyecto, por tanto, tendría un impacto socio-económico positivo ya que ayudaría en la creación de empleo en el sector e incrementaría el número de productos ofertados en el mercado. Pudiendo lograr así, un mayor volumen de ventas.

## 1.2. Motivación

La propensión actual a la realización de deporte, hace que el número de usuarios de bicicletas haya aumentado en los últimos años, ya que son muchos los que eligen el ciclismo para mantenerse en forma.

Con la, cada vez más acusada, expansión del mercado de la bicicleta, surgen infinidad de modelos que se adaptan a las características de cada usuario. En la actualidad están apareciendo modelos de bicicletas, sobre todo de montaña, cada vez con características más específicas consiguiendo que cada modelo sea óptimo para un tipo de práctica distinto. En la Figura 1.4 y la Figura 1.5 se puede apreciar la notable diferencia entre una bicicleta de “cross country” (Figura 1.4) y una de descenso o “downhill” (Figura 1.5).



*Figura 1.4. Specialized Epic Hardtail Pro Carbon World Cup. [2]*



*Figura 1.5. Specialized S-Works Demo 8. [3]*

A pesar de la multitud de usuarios, este proyecto se centrará en la minoría que es el ciclismo de competición. En la gran mayoría de las disciplinas del deporte, las mejoras tecnológicas se inician en el mundo de la competición y es por ello que el proyecto se enfoca hacia ese sector.

En muchas ocasiones, los avances tecnológicos que llegan al mercado nacen en el sector de la alta competición. Esto es debido a las prioridades de cada sector; que en el caso del consumidor habitual son precio y rendimiento al mismo nivel, incluso el precio es dominante en la mayoría de los casos; mientras que en la alta competición el factor predominante es el rendimiento antes que el precio. Prueba de ello son los vehículos de competición en los que emplean elevados costes en comparación con los vehículos utilitarios.

A pesar de ello, los avances llegan al consumidor por la mejora de la técnica, que conlleva procesos menos costosos y acercan la tecnología al consumidor.

Hay un mercado poco explotado aparentemente y es el de los materiales aplicados a la práctica, tales como la fabricación mediante deposición aditiva de material, es otro tema que tratará el trabajo.

### **1.3. Estructura del proyecto**

En el proyecto se realizará, en primer lugar, una breve introducción a la historia del ciclismo de montaña, a las diversas modalidades del mismo, las características básicas de cada tipo de bicicleta en función de la modalidad, así como a los componentes de la bicicleta más relevantes para el proyecto.

En segundo término, se introducirán los métodos y materiales de fabricación, así como, las tecnologías utilizadas en el tratamiento de los materiales. Además, se incluirá la normativa a la que está sujeta el proyecto.

A continuación, se realizará la modelización de dos diseños con distintas características mediante programas informáticos para la modalidad de ciclismo seleccionada, que es el XC o cross country. Y se comentarán los factores a tener en cuenta en cuanto a la geometría del diseño y las tecnologías aplicadas a cada diseño. Cada modelo se diseñará para ser fabricado de una manera distinta y se compararán los resultados.

Posteriormente, dichos diseños serán analizados de acuerdo a la normativa aplicable, haciendo uso de programas computacionales que incluyen el método de los elementos finitos. En concreto serán analizados mediante tres ensayos de fatiga cada uno, un ensayo de fatiga con fuerzas horizontales, otro con fuerzas verticales y el último con fuerzas de pedaleo.

Por último, se realizará una comparativa de resultados de los ensayos, se desarrollarán las conclusiones del proyecto en base a los diseños y análisis llevados a cabo. Y además, se elaborará el presupuesto del proyecto.

## **2. OBJETIVOS DEL PROYECTO**

---

El principal objetivo del presente proyecto es el diseño y análisis de dos cuadros rígidos para bicicleta de montaña, con la misma geometría, pero distintas características en cuanto al método de fabricación. Uno de ellos será diseñado como un cuadro de aluminio fabricado con tubos soldados, y el otro, de aluminio también, pero fabricado en monocasco.

Para la consecución de este objetivo principal se perseguirán los siguientes objetivos parciales:

- Investigación de la tecnología más reciente e innovadora aplicable a los modelos. Referentes a los componentes que se montarán en ellos.
- Conocimiento de los materiales utilizados en la industria de la bicicleta para la fabricación de los cuadros, y selección de los más adecuados para dicho propósito.
- Conocimiento de las técnicas de fabricación más utilizadas, e investigación de nuevas técnicas que mejoren las existentes.
- Estudio de los parámetros referentes a la geometría de los cuadros y adaptación a los modelos diseñados para lograr modelos competitivos, comparables a los existentes.
- Diseño de los modelos mediante un software de diseño tridimensional (en este caso se empleará el software académico Solid Edge en su versión ST9).
- Estudio de la normativa vigente para la determinación de cargas y condiciones de contorno bajo las que deben ser ensayados los modelos.
- Simulación del comportamiento de ambos modelos bajo las condiciones de carga y restricciones determinadas en el objetivo anterior. Para llevarlo a cabo se utilizará el software de elementos finitos ANSYS en su versión 17.
- Por último, se establecerá una comparación de ambos modelos entre sí, en cuanto a los ensayos realizados; y con otros modelos en cuanto al peso de los mismos.

### 3. ANTECEDENTES

---

#### 3.1. Historia de la bicicleta de montaña

La bicicleta, tal como se conoce en la actualidad: un vehículo de dos ruedas impulsado mediante un sistema mecánico y dirigido mediante un manillar, no surge hasta 1885 de la mano del británico John Kemp Starley. Cuyo invento se muestra en la Figura 3.1, y es denominado “bicicleta de seguridad”, por la inclusión de frenos [4].



*Figura 3.1. Safety Bicycle de J. K. Starley. [4]*

Este concepto de bicicleta había nacido del invento que se muestra en la Figura 3.2, conocido como celerífero e ideado por el francés Sivrac en 1790. Este invento carecía de elementos mecánicos que lo impulsasen y dirigiesen. El método de utilización era sencillo, el usuario situaba el celerífero entre sus piernas y se apoyaba en él, para hacerlo avanzar no tenía más que caminar. Esto le permitía al usuario recorrer distancias llanas con menor esfuerzo que caminando [5].



*Figura 3.2. Celerífero de Sivrac. [5]*

La bicicleta continúa su evolución, en 1888 se añadieron neumáticos con cámara de aire ideados por John Boyd Dunlop como sustitución de los neumáticos macizos de caucho. Posteriormente los hermanos Michelin crean un neumático desmontable. Con esto se conseguía ir a cualquier lugar con unas cuantas cámaras y un único neumático [4].

Además, en 1890 surge una nueva idea para mejorar los cuadros de las bicicletas, y es la de cuadros en forma de doble triángulo o diamante, de la mano de la marca Schwinn. En Inglaterra se demostró que esta configuración en el cuadro mejoraba su comportamiento frente a vibraciones y esfuerzos de tracción y compresión.

Se considera que el ciclismo de montaña o mtb nace de la mano de John Finley Scott cuando, en 1953, idea su modelo de bicicleta denominado woodsy [6]. Esta bicicleta ya incorporaba un cambio de marchas rudimentario como se muestra en la Figura 3.3, y ruedas 650B o de 27,5 pulgadas. Scott la había ideado para acceder a la sierra californiana, aunque aún no era una práctica muy extendida.

En 1970 surge una moda que consistía en utilizar las bicicletas en caminos de tierra, para descender por la montaña. Inicialmente se utilizaron bicicletas convencionales para dicha práctica. Esta moda era practicada por grupos de jóvenes denominados “The Canyon Gang”, que competían por ver quién era más rápido en este terreno, en el monte Tamalpais, California.



*Figura 3.3. Woodsy de J. F. Scott. [6]*

Fruto de esta competencia, Joe Breeze, Charlie Kelly, Gary Fisher y Tom Ritchey deciden incorporar llantas anchas a sus bicicletas para ganar estabilidad, control y, sobre todo, velocidad para ganar carreras. A partir de este momento había aparecido el concepto de bicicleta de montaña, que, con los años y las mejoras tecnológicas, se distanciaría del ciclismo convencional o de carretera, que se había instaurado hasta la fecha.

Breeze se basó en su bicicleta Schwinn, modelo Excelsior X, para construir nuevos cuadros de cromoly que es una aleación de acero con cromo-molibdeno, como el mostrado en la Figura 3.4. Los diseños de Breeze impactaron a Gary Fisher, que mandó a su compañero Tom Ritchey que le construyera un cuadro como aquellos [7].



*Figura 3.4. Bicicleta con cuadro de cromoly, de Joe Breeze. [7]*

Gary Fisher, junto a Charlie Kelly y Tom Ritchey decidió formar la compañía MountainBikes en 1979, primera empresa dedicada al ciclismo de montaña. Finalmente, Fisher, en 1993 vendió su marca a la compañía americana Trek. Por otro lado, Ritchey



se especializó en todo tipo componentes desde tijas, manillares, potencias, cuadros, hasta la actualidad que sigue operando con su propia marca Ritchey Logic. Ritchey fue de los pioneros en utilizar titanio y aluminio en los cuadros que hasta el momento la mayoría se construían con acero.

Fisher fue uno de los inventores de las ruedas de 29 pulgadas. Y es que, en sus inicios, como se vio en la bicicleta de John Finley Scott, se llevaban ruedas grandes. Aunque, con el avance de la historia se desarrollaron ruedas más pequeñas, de 26 pulgadas, para conseguir bicicletas más manejables y ágiles. A pesar de esto, el mercado actual está regresando a las ruedas grandes de 27,5 y 29 pulgadas, y anchas de hasta 5 pulgadas.

Con el tiempo fueron apareciendo mejoras tecnológicas, como los cambios traseros más avanzados, surgiendo grupos de transmisión de tres platos y siete velocidades conocidos en sus orígenes como 21 vitesses, según la denominación francesa. En la actualidad la tendencia son las transmisiones de un único plato, o dos, y once velocidades, aunque en 2016 la marca de transmisiones sram inventó el denominado Eagle 1x12 con doce velocidades y un plato que deja prácticamente obsoleto a los grupos de tres platos, y en el futuro a los de dos también.

Surgen también de la mano de la marca americana Rock Shox, las suspensiones, en un principio eran horquillas delanteras de aire, aceite o muelle, cuya finalidad era mantener la rueda el mayor tiempo posible en contacto con el suelo irregular. Para aumentar la comodidad y el control sobre la bicicleta aparecen los primeros amortiguadores traseros junto con las bicicletas de doble suspensión. Ha sido tal el avance tecnológico en este campo que en la actualidad existen sistemas que controlan la dureza de la suspensión en función del terreno que se transite, como el sistema brain de la marca spezialized [8].

En cuanto a los cuadros, en sus inicios se fabricaban en acero, a continuación, en aluminio y titanio procedentes de la industria aeronáutica, y en la actualidad se pueden encontrar cuadros de fibra de carbono e incluso magnesio. Una reciente incorporación, que apunta al futuro, ha sido la presentación del primer cuadro fabricado con láminas de grafeno de mano de la empresa británica Dassi Bikes en 2016. Este cuadro mostrado en la Figura 3.5 pesa 750 gramos, cuando los existentes hasta la fecha rondaban los 1000 o 1200 gramos (los más ligeros). No solo esto, la marca asegura que en un futuro no muy lejano se podrán fabricar cuadros de 350 gramos que supondrían una impresionante evolución en el sector [9].



*Figura 3.5. Cuadro con láminas de grafeno de Dassi Bikes. [9]*

Gracias a la innovación tecnológica, se ha conseguido reducir el peso de las bicicletas de montaña, de los 20 kilogramos a la mitad, 10 kilogramos en bicicletas de alta gama.

Esto ha sido posible, en parte, a la introducción de nuevos materiales más resistentes y ligeros en todos los componentes, y a las mejoras técnicas introducidas en el sector.

## 3.2. Definiciones

### 3.2.1. Componentes de la bicicleta

En este apartado se definirán los componentes más relevantes para el diseño del cuadro rígido que se tendrán en cuenta a lo largo del proyecto.

- **Cuadro**

El componente estructural más importante de la bicicleta es el cuadro, encargado de unir el resto de partes y principal encargado de soportar el peso del usuario. Está formado por tubos de diferentes longitudes y en la mayoría de los casos de diferentes secciones. La posición de dichos tubos determinará el tipo de geometría del cuadro y, con ella, sus prestaciones y capacidad de adaptación a cada tipo de terreno.

En la Figura 3.6 y la Tabla 3.1 se muestra la posición y el nombre de los principales tubos que forman el cuadro. La geometría de cada tubo será crucial para determinar el comportamiento del cuadro, y con ello, de la bicicleta en su conjunto [10].



Figura 3.6. Tubos de un cuadro de bicicleta. [11]

Tabla 3.1. Tubos de un cuadro de bicicleta.

Número	Nombre del tubo
1	Tubo horizontal
2	Tirante o vaina superior
3	Tubo del sillín
4	Tubo de dirección, de horquilla, frontal o caja de dirección
5	Tubo inferior
6	Vaina
7	Caja de pedalier

- **Horquilla**

Otro componente de gran importancia es la horquilla, encargada de unir la rueda delantera a la bicicleta y amortiguarla, con el fin de aislar al ciclista de las irregularidades del terreno. Pueden ser rígidas o amortiguadas. La diferencia de peso entre ambas se encuentra en torno a 1 kilogramo a favor de las rígidas.

En el ciclismo de montaña, por lo general, se suelen utilizar horquillas amortiguadas. Aunque la tendencia actual por minimizar el peso de la bicicleta lleva a que se puedan encontrar corredores que opten por utilizar horquillas rígidas, sobre todo en pruebas maratón en las que se transcurre por pistas de terreno llano el 80% del tiempo, y en muchos casos las horquillas amortiguadas restan rendimiento en la pedalada y presentan un mayor peso.

- **Dirección**

La unión entre cuadro y horquilla se realiza mediante la caja de dirección que se aloja en el tubo frontal del cuadro. Permite el giro correcto del manillar para guiar la bicicleta por los diferentes terrenos. Está formada por cazoletas y rodamientos que pueden ir roscados o embutidos en el cuadro. Existen de varios tipos en función de su instalación en el tubo frontal, y su nomenclatura se encuentra estandarizada mediante el SHIS (Standardized Headset Identification System); sistema estandarizado de identificación de direcciones [12]. En la Figura 3.7 se muestra una dirección de la marca FSA.



Figura 3.7. Dirección FSA Orbit 1.5 ZS 1.1/8. [13]

- **Manillar y potencia**

Los elementos encargados de otorgar movimiento a las direcciones son la potencia y el manillar. La potencia es el elemento encargado de unir el manillar a la horquilla evitando que ésta se salga de su posición correcta. Existen de diferentes longitudes y con diferentes ángulos de inclinación, que permiten al ciclista adaptarse mejor a la geometría de la bicicleta para lograr mayor confort y rendimiento. El manillar es el tubo que permite al ciclista actuar sobre la rueda delantera para guiar la bicicleta; igual que las potencias, existen de diferentes longitudes y angulaciones para adaptarse a la conducción del usuario. En la Figura 3.8 se puede observar el conjunto manillar, potencia y dirección.



Figura 3.8. Conjunto manillar-potencia-dirección. [14]

- **Tija**

Otra parte importante para adaptar la bicicleta al ciclista es la tija del sillín que es el tubo encargado de unir el sillín al cuadro. La tija se aloja en el interior del tubo del sillín y permite regular en altura la posición del ciclista.

- **Ruedas**

Pasando a las partes rodantes de la bicicleta, se encuentran las ruedas, compuestas por diversos elementos: la cubierta, parte de la rueda en contacto con el suelo; la llanta, elemento estructural que da forma a la rueda; la cámara, tubo de goma que se encuentra en la llanta y la cubierta que da forma a esta última; el eje, componente de unión de la rueda al cuadro o la horquilla; y, por último, el buje, encargado de unir el eje con la llanta mediante los radios, el trasero contiene el núcleo sobre el que van montados los piñones que permiten propulsar la bicicleta.

- **Transmisión**

El último componente que se tendrá en cuenta es el conjunto de transmisión, formado por la caja de pedalier, el eje, las bielas, los pedales, la cadena, los piñones, los cambios delantero y trasero, y la patilla de cambio. En la Figura 3.9 se muestran dichos componentes y en la Tabla 3.2 la función de cada uno.



Figura 3.9. Conjunto de transmisión. [11]

Tabla 3.2. Conjunto de transmisión.

Número	Componente	Descripción
1	Patilla de cambio	Elemento de unión del desviador al cuadro; actúa como fusible: en caso de tensiones excesivas, se rompe para evitar daños mayores en el cuadro o el desviador.
2	Piñones	Ruedas dentadas solidarias al buje trasero de la rueda que permiten el movimiento de la rueda en el sentido del avance.
3	Cambio delantero	Permite modificar la relación de transmisión actuando sobre los platos. Se encuentra alojado en la parte inferior del tubo del sillín.
4	Platos	Ruedas dentadas unidas solidariamente al eje de pedalier y las bielas.
5	Biela	Le permite aplicar el momento adecuado al ciclista para producir el avance de la bicicleta.
6	Eje pedailer	Eje que une las bielas de ambos lados.
7	Cadena	Permite transmitir el movimiento del eje pedalier al buje de la rueda trasera (de los platos a los piñones).
8	Desviador	Permite modificar la relación de transmisión actuando sobre los piñones. Se encuentra unido al cuadro mediante la patilla de cambio en la unión de las vainas y los tirantes.

### 3.2.2. Modalidades y categorías del ciclismo de montaña

Existen diversidad de tipos de bicicletas de montaña. Y para cada una de ellas existe un terreno en el que sacar el máximo rendimiento a las características de cada tipo. Por supuesto, todas son válidas para practicar cualquier modalidad, pero cada bicicleta ha sido diseñada para un tipo de terreno específico, por lo que los parámetros de confort, estabilidad y rendimiento se verán alterados en función el uso que se vaya a dar a este vehículo. Es decir, una bicicleta en un terreno para el que no ha sido diseñada tendrá una desventaja notable frente a una que si ha sido diseñada para tal fin [15].

Principalmente se distinguen cuatro modalidades de ciclismo de montaña, el downhill o DH, el all mountain, el enduro y el cross country o XC. En las tres primeras, por norma general se suelen utilizar bicicletas de doble suspensión y en la última se suelen utilizar bicicletas rígidas, aunque también se ven algunas de doble suspensión.

- **Downhill**

El downhill, DH o descenso, es una modalidad en la que el objetivo es descender la montaña en el menor tiempo posible. Se practica en terrenos altamente escabrosos y por senderos de difícil acceso, en muchos casos, incluso a pie. El circuito suele presentar saltos, zonas de grandes piedras, curvas de 180 grados y árboles que el ciclista debe esquivar a toda velocidad en su carrera por ser el primero en llegar abajo.

Las bicicletas utilizadas en el downhill suelen ser bicicletas muy robustas, con cuadros reforzados y tienen un centro de gravedad bastante bajo. Además, cuentan con suspensiones de largo recorrido tanto delante como detrás, de entre 180 y 200 milímetros; y ruedas de 27,5 pulgadas y de 2,35 pulgadas de ancho. Por lo general, son bicicletas diseñadas para no dar pedales ya que las suspensiones de tan largo recorrido reducen rendimiento en las pedaladas, los ciclistas suelen subir andando o aprovechando los remontes de las estaciones de esquí para posteriormente descender. Estas bicicletas suelen pesar entre 13 y 16 kilogramos.

En la Figura 3.10 se observa la bicicleta Mondraker Summun del campeón del mundo de downhill, Danny Hart.



Figura 3.10. Mondraker Summun 2017. [16]

- **Enduro**

El enduro es una modalidad cuyo principal objetivo es el descenso de la montaña por caminos y sendas no tan complicados como los circuitos de downhill, pero con alguna complicación técnica.



Las bicicletas que se emplean en esta modalidad son bicicletas con suspensiones de recorrido entre 120 y 160 milímetros, y ruedas de 27,5 pulgadas, anchas, similares a las del downhill. Estas bicicletas no están pensadas para afrontar ascensiones pedaleando, pero no reducen tanto el rendimiento de la pedalada como las de downhill. Éstas suelen pesar entre 12 y 14 kilogramos.

En la Figura 3.11 se muestra el modelo RIP 9 RDO Race elite de marca Niner.



*Figura 3.11. Niner RIP 9 RDO 5-STAR X01 EAGLE 29 ENVE 2017. [17]*

- **All mountain**

A continuación, la modalidad de all mountain o trail, es una disciplina intermedia entre la obtención del máximo rendimiento de la bicicleta tanto en el ascenso como en el descenso, y el disfrute y la comodidad del usuario. Se asocia a todo tipo de terreno, senderos de leve dificultad técnica y caminos denominados rodadores; éstos son pistas anchas en terreno llano.

Las bicicletas diseñadas para esta modalidad son bicicletas de doble suspensión con recorridos de entre 100 y 140 milímetros, entre las que se pueden encontrar ruedas de todos los tamaños y anchuras tanto de 27,5 como de 29 pulgadas.

En la Figura 3.12 se puede ver la bicicleta de all mountain, la Cannondale Habit 6.



*Figura 3.12. Cannondale Habit 6 2017. [18]*

- **Cross country**

Por último, la modalidad de cross country o XC, es la modalidad más competitiva, extendida y popular del ciclismo de montaña. Para muchos esta modalidad es considerada el ciclismo de montaña en sí, se desarrolla en todo tipo de terrenos y se caracteriza por llevar al ciclista al límite, es decir, ascender en el menor tiempo posible y descender a la mayor velocidad posible; en su vertiente más competitiva.

Esta modalidad alberga otras que comparten un objetivo final, ser el más rápido en conjunto, y se diferencian en duración o contenido.

Una de estas subcategorías es el XCO o cross country olímpico, es la categoría por excelencia de esta modalidad. En ésta, los corredores compiten por ver quién es el más rápido en dar un número de vueltas determinadas a un circuito que incluye ascensos, descensos, zonas de alta complejidad técnica y los denominados rock garden que son tramos de piedras en los que el terreno no es del todo firme. Esta categoría se introdujo en el programa de los Juegos Olímpicos en Atlanta 1996.

Otra subcategoría es el XCE o cross country eliminator que consiste en recorrer un circuito de aproximadamente cinco kilómetros de baja complejidad técnica. En esta categoría se enfrentan 4 o 6 corredores de los cuales los primeros pasan a la siguiente ronda y los últimos quedan eliminados.

La última subcategoría, aunque existen muchas más derivadas de estas tres principales, es la de XCM o cross country maratón, que suele ser una competición por etapas sumando un gran número de kilómetros. Cada etapa puede tener de 80 a 150 kilómetros y transcurre por todo tipo de terreno desde carretera o pista hasta terreno técnico de piedras o incluso arena. Cada etapa se suele partir de un punto y llegar a otro distinto, aunque también es común llegar al mismo; lo que no suele ser habitual es recorrer un número de veces un circuito por vueltas como en XCO.

Las características de estas bicicletas son la ligereza y versatilidad, además de la maniobrabilidad y el rendimiento, y es que están diseñadas para no perder ni el más mínimo vatio de potencia en cada pedalada. Es por esto que se emplean bicicletas rígidas con suspensión delantera de 100 milímetros de recorrido o bicicletas con amortiguadores traseros de 80 milímetros, para mantener las dos ruedas en contacto con el suelo el mayor tiempo posible, sobre todo, en los circuitos de mayor exigencia técnica. Se utilizan ruedas de 29 pulgadas porque proporcionan mayor inercia por lo que se puede alcanzar mayor velocidad con menos esfuerzo. Estas bicicletas suelen pesar entre 9 y 11 kilogramos.

En las siguientes figuras se muestran: en la Figura 3.13, la BMC Teamelite 01 de Julien Absalon; y en la Figura 3.14 la Scott spark del campeón del mundo de XC 2016 Nino Schurter. A pesar de que una es rígida y la otra doble, tienen un rendimiento similar y la doble pesa unos gramos más.



*Figura 3.13. BMC Teamelite 01 XTR Di2 2017. [11]*





*Figura 3.14. Scott Spark RC 900 SL 2017. [19]*

De todas estas modalidades, únicamente las competiciones XC (cross country) y DH (downhill) están reguladas por la UCI, que es la Unión Ciclista Internacional. Aunque el resto de modalidades se practican y tienen competiciones específicas, principalmente se utilizan las modalidades para designar a cada tipo de bicicleta de montaña.

### 3.3. Tecnologías

En este apartado se comentarán las principales tecnologías referentes al cuadro de la bicicleta. A lo largo del tiempo, en la industria de la bicicleta se ha pretendido una estandarización con el objetivo de aunar las medidas principales de los componentes, permitiendo así la fácil sustitución de los mismos por otros con características distintas. A pesar de esta pretensión, marcas con elevadas ventas pretenden todo lo contrario, la exclusividad de sus productos; y es por esto que existen diversos estándares en la industria. En este apartado se tratarán dichos estándares.

#### 3.3.1. Tipos de direcciones

En primer lugar, se tratará el tema de las direcciones, en concreto, los principales tipos y estándares existentes en la industria. Como se vio en apartados anteriores, la dirección de la bicicleta es la encargada de conseguir una conjunción correcta entre cuadro y horquilla para lograr guiar la bicicleta por los terrenos transitados.

En la elección de la dirección cabe destacar varios aspectos; uno de ellos, es que en su interior se deberá introducir el tubo de la horquilla; otro, es que se deberá introducir en el tubo frontal del cuadro. Lo que radica en que existirán direcciones en función del diámetro exterior de la horquilla, del diámetro interior del tubo frontal y de la forma de unión de la dirección en el tubo frontal [12].

En cuanto al diámetro exterior del tubo de la horquilla, en sus inicios, la medida seleccionada fue la de 1 pulgada, y con el tiempo se introdujo la medida de 1 y 1/8 de pulgada. Con un tubo de mayor diámetro se conseguían mejores valores de rigidez. Para aumentarla aún más, en la actualidad se han introducido los tubos cónicos, de 1 y 1/8 de pulgada en su parte superior y 1 y 1/2 de pulgada en su parte inferior.

Con la aparición de los tubos cónicos se consigue una dirección más precisa ya que permiten alojar rodamientos de mayor tamaño en la parte inferior que es la zona que soporta mayor peso. Las direcciones que se utilizan con dichos tubos se denominan tapered. Su forma se muestra en la Figura 3.15.

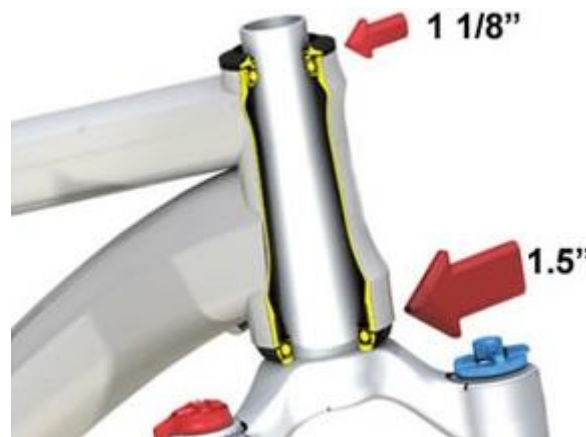


Figura 3.15. Dirección tapered. [12]

En cuanto al otro factor de selección de una dirección, su unión al tubo frontal del cuadro, ocurre una situación similar; se procede a dimensionar los nuevos cuadros con el fin de alojar las nuevas direcciones adaptadas a los diámetros de la horquilla. Además, estas direcciones deben unirse al cuadro y no en todos los casos lo hacen de igual forma, se

pueden unir mediante uniones roscadas (denominadas de cazoletas), o embutidas en el interior del tubo (denominadas ahead).

Como cabe esperar esta diversidad de medidas no ayuda a dicha pretensión de estandarización comentada con anterioridad, porque los fabricantes deben dar soporte a todas las medidas. Estas razones llevaron a un grupo de fabricantes, líderes en conjuntos de dirección, a establecer un sistema estandarizado para identificar cada tipo de dirección en función del tipo de unión al cuadro y los diámetros de la misma. Este sistema lo denominaron S.H.I.S. (Standarized Headset Identification System) [12] y [20].

En el sistema de identificación de direcciones estandarizado se distinguen tres tipos de direcciones: EC (External Cup), que corresponde con sistemas convencionales en los que las cazoletas que contienen a los rodamientos se encuentran fuera del cuadro; ZS (Zero Stack) o semi-integrado, en los que los rodamientos se alojan en las cazoletas y éstas se encuentran embutidas en el tubo frontal; y por último, IS (Integrated Headset), que corresponde a sistemas completamente integrados en los que los rodamientos se encuentran montados directamente en el interior tubo de dirección

Para identificar la dirección, el sistema utiliza las siglas correspondientes al tipo de dirección seguidas de dos números. El primero de éstos hace referencia al diámetro interno del tubo frontal del cuadro, y el segundo indica el diámetro interno del rodamiento o el diámetro externo del tubo de la horquilla, que son la misma medida. En la Figura 3.16 se muestran un ejemplo de la forma de cada tipo de dirección.

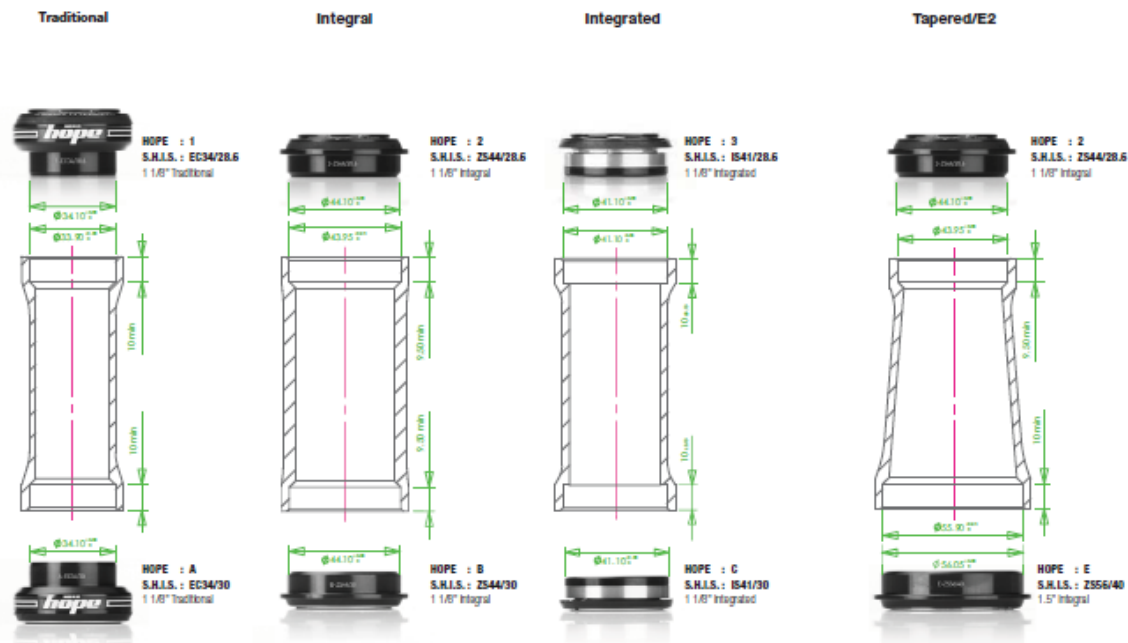


Figura 3.16. Tipos de direcciones estandarizadas, S.H.I.S. [20]

### 3.3.2. Tipos de caja de pedalier

El eje de pedalier es el encargado de soportar toda la potencia que ejerce el ciclista al pedalear. Por tanto, se requiere de la mayor rigidez posible en la caja de pedalier para maximizar el rendimiento de la pedalada, en caso de un pedalier de baja rigidez gran parte de la energía se disipará en la flexión del mismo. Ésta se consigue al aumentar la distancia entre los rodamientos, aumentan el diámetro del eje y maximizando la superficie de unión biela-eje [21], [22] y [23].

Existen diversos tipos de ejes de pedalier en función de la caja que los alberga. En primer lugar, los más antiguos, de cuadrado, como el de la Figura 3.17. Se alojaban en cajas de pedalier de 35 milímetros de diámetro interno y 68 o 73 de longitud, roscadas mediante rosca inglesa o italiana. El eje era de 17 milímetros y la longitud dependía de la biela que se fuese a montar, en la actualidad están en desuso.



*Figura 3.17. Eje pedalier tipo cuadrado. [22]*

El salto significativo de rigidez se produjo con la aparición de los pedalieres hollowtech de la marca shimano, que aumentan la distancia entre rodamientos hasta sacarlos de la caja de pedalier y su tamaño, consiguiendo que el diámetro exterior coincida con el de la caja de pedalier. Con esto se consiguen mayores diámetros de eje, hasta 24 milímetros, y, por tanto, un aumento notable de rigidez. Como se muestra en la Figura 3.18, éstos también son roscados.



*Figura 3.18. Eje pedalier tipo hollowtech. [22]*

A continuación, como sucede en los sistemas de dirección, los ejes de pedalier evolucionan hacia pedalieres no roscados. Se distinguen dos tipos, los BB (Bottom Bracket) y los PF (Press Fit).

Los BB consisten en un par de rodamientos, un par de circlips que hagan de tope y eviten que el rodamiento se desplace al interior de la caja de pedalier, y un par de guardapolvos que preserven la integridad del rodamiento. En la Figura 3.19 se muestra este tipo de pedalier. Con el sistema BB30 se requieren cajas de pedalier de 42 milímetros de diámetro interno y se pueden instalar ejes de hasta 30 milímetros en su interior.

Por último, el sistema PF utiliza cazoletas para alojar los rodamientos y la longitud de la caja de pedalier asciende hasta medidas de 86,5, 89,5 y 92 milímetros, y un diámetro interno de 41. En la Figura 3.20 se puede observar el montaje de un eje press fit.

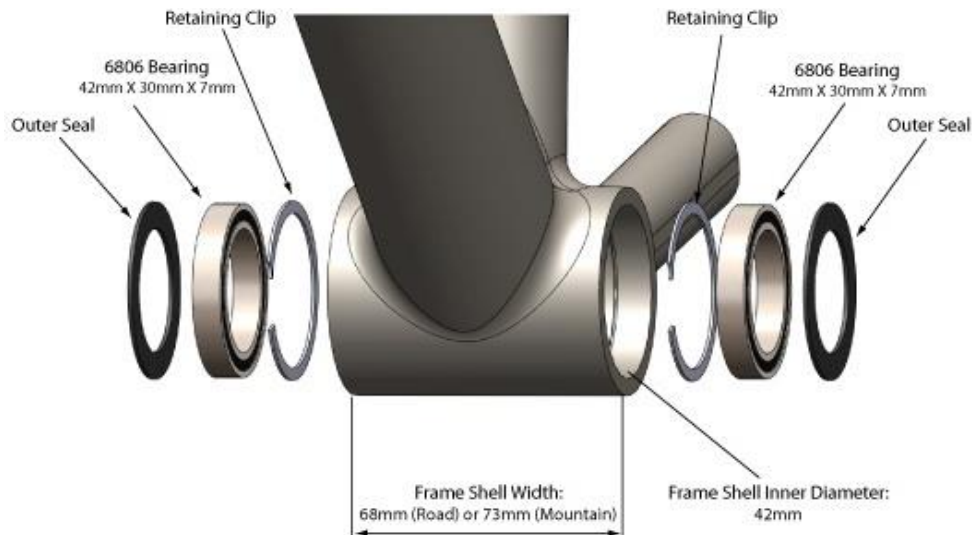


Figura 3.19. Eje pedalier tipo BB30. [21]

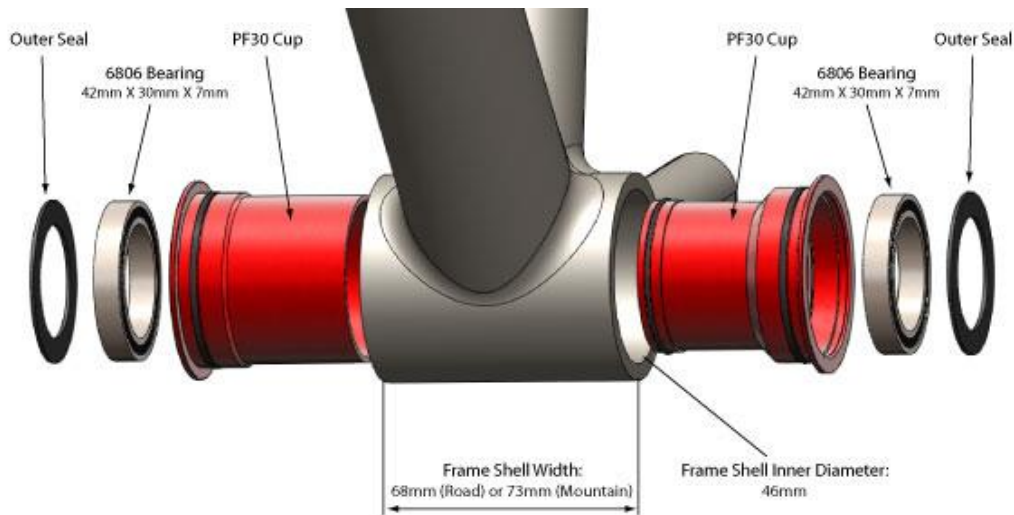


Figura 3.20. Eje pedalier tipo PF30. [21]

### 3.3.3. Tipos de ejes de rueda

Con la evolución de la industria hacia ruedas grandes, de 26 pulgadas a 29 y 27,5, en la actualidad; los ejes que las unen al cuadro, y la horquilla, también han evolucionado. Al aumentar el diámetro de la rueda se requiere mayor rigidez en el conjunto proporcionada, generalmente, por un aumento del diámetro del eje.

Es por esto que en la actualidad se distinguen tres tipos de ejes en función de su diámetro: el QR (quick release) o cierre rápido, el eje pasante, y los recientemente incorporados a la industria, ejes boost [24].

Los ejes de tipo cierre rápido son ejes huecos de 9 y 10 milímetros, para ruedas delantera y trasera, respectivamente. Están incorporados en el buje de la rueda y no se suelen retirar si no es por labores de mantenimiento. Su unión al cuadro se produce mediante una varilla de 5 milímetros, y suelen tener medidas de 100 milímetros para la rueda delantera y 135 para la trasera. En la Figura 3.21 se encuentra una varilla de un eje QR [25].



*Figura 3.21. Eje QR o cierre rápido. [25]*

Con la aparición de las ruedas grandes irrumpen en la industria los ejes pasantes que tienen mayor diámetro que los QR, en concreto, valores de 15 milímetros para la rueda delantera, llegando en algunos casos a 20 o 25 milímetros para las modalidades de enduro o downhill; y para la rueda trasera de 12 milímetros. Las longitudes apenas varían para la rueda delantera, con respecto a los QR, con valores de 100 o 110 milímetros; sin embargo, en la rueda trasera llegan a alcanzar los 142 milímetros.

Por último, cabe destacar la tendencia actual de la industria, que son los ejes boost. son la evolución de los ejes pasantes a mayores longitudes de eje, alcanzando los 148 milímetros, y permitiendo así ganar 10 milímetros de espacio extra en la rueda delantera, y 6 en la trasera. Con esta ganancia se consigue aumentar el ángulo de ataque de los radios y con ello, la rigidez de la rueda, un factor crucial en las ruedas de mayor diámetro. En la Figura 3.22 se muestra un eje boost [26].



*Figura 3.22. Eje boost. [26]*

### **3.3.4. Tipos de desviador delantero**

El desviador delantero es el encargado de cambiar de plato, y con ello, de modificar la relación de transmisión. Este componente va unido al cuadro en el tubo del sillín y en función de la unión existen diferentes tipos de desviadores, de abrazadera, tipo E y de montaje directo o Direct Mount [27].

En cuanto a los desviadores de abrazadera, se montan mediante una abrazadera sujeta a la parte baja del tubo del sillín. Existen de dos tipos, de abrazadera alta o baja. los primeros, son los más convencionales, y los segundos, se suelen encontrar en bicicletas de doble suspensión como solución ante la falta de espacio que se produce en ellas, debido a la instalación del sistema de suspensión trasera.



Los de tipo E aparecen para casos aún más críticos que los de abrazadera baja, sobre todo, en montajes en los que la geometría de la bicicleta de doble suspensión es excesivamente compleja. Se monta en una pletina sujeta entre el eje pedalier y el cuadro, como se muestra en la Figura 3.23.



*Figura 3.23. Desviador delantero tipo E. [27]*

Por último, los desviadores Direct Mount requieren un cuadro preparado para su montaje ya que se encuentran atornillados en la parte baja del tubo del sillín. Se utilizan en la modalidad de cross country por su reducido peso y por la reducción del factor Q, que consiste en la reducción de distancia entre las bielas para asegurar un movimiento biomecánico del ciclista óptimo. En la Figura 3.24 se muestra dicho sistema.



*Figura 3.24. Desviador delantero tipo Direct Mount. [27]*

### **3.4. Materiales**

En este apartado se considerarán los materiales utilizados en la fabricación de un cuadro de bicicleta. Los materiales más utilizados en la industria son el acero, el aluminio, los compuestos de fibra de carbono y el titanio; en concreto, en el ciclismo de montaña se emplean mayoritariamente aluminio y compuestos de fibra de carbono. El uso de estos materiales viene determinado por la relación rigidez-peso que se puede observar en la Figura 3.25, y en muchos casos resistencia-peso-coste [28].



Figura 3.25. Comparación de materiales según peso y rigidez. [28]

### 3.4.1.Acero

El acero es un metal compuesto por una base de hierro y un pequeño porcentaje de carbono, en la mayoría de casos, inferior al 2%. Además, se le agregan otros compuestos para alterar sus propiedades como la maleabilidad, la dureza, la resistencia, la tenacidad y otras, que lo hacen más fácil de procesar. Algunos de estos materiales son el cromo, que mejora la tenacidad, la resistencia a la corrosión o la templabilidad; el magnesio, que aumenta la resistencia a la abrasión y al desgaste; el molibdeno, que mejora la resistencia a la temperatura elevada, la tenacidad o la dureza; o el silicio, entre otros muchos, que mejora la maquinabilidad, resistencia o dureza [29] y [30].

Para identificar los tipos de acero, en la industria se utiliza la denominación de American Iron and Steel Institute (AISI) o de Society of Automotive Engineers (SAE). Esta denominación consiste en un código de cuatro dígitos en el que el primero indica el principal aleante del acero; el segundo, el porcentaje del elemento principal; y los dos últimos, la cantidad de carbono que contiene la aleación.

En el caso del acero utilizado en el ciclismo, suele ser el acero 41xx, que es una aleación con cromo y molibdeno entre otros, conocida en la industria como cromoly. Ésta presenta un porcentaje en carbono en torno al 0,35%; cromo, 1%; y molibdeno, 0,2%; además de silicio en torno al 0,15%. Es una aleación más dura y resistente que el acero convencional, resistente a la oxidación gracias al cromo, y con alta soldabilidad. En concreto, la aleación más utilizada es el acero 4130.

Las ventajas, en cuanto a propiedades se refiere son notables en comparación con el acero convencional, ya que se permite fabricar tubos de espesor mínimo de hasta 40 micras de espesor con buenas cualidades para soportar las solicitaciones de la industria de la bicicleta. Por otro lado, alcanzar espesores tan pequeños supone problemas al realizar las soldaduras. La solución utilizada para solventar dichos problemas es la de aumentar el grosor de los tubos en sus extremos evitando que se debiliten durante dicho proceso.

A pesar de las buenas características que aporta el acero a la bicicleta, un peso aceptable para la rigidez que se consigue y su bajo coste, no es el material más utilizado en la industria. Quedando relegado su uso al ciclismo de carretera, ya que otros materiales como el aluminio ofrecen mejor relación resistencia-peso-precio, y son más



adecuados para las solicitaciones del ciclismo de montaña. En concreto, la comparación entre dos cuadros, uno de aluminio y otro de acero, el de aluminio presenta una mayor amortiguación que el de acero por lo que es más confortable que éste.

### **3.4.2. Titanio**

El titanio aparece como alternativa al aluminio y al acero. Es un metal blanco plateado, alotrópico, es decir, posee diferentes estructuras cristalinas según la temperatura a la que se encuentre. Sus aplicaciones en la industria aeroespacial, en la que se requiere que el peso sea mínimo y la resistencia máxima, lo hacen atractivo para el mercado de la bicicleta.

Sus principales propiedades son una elevada relación resistencia-peso, es decir, baja densidad y un alto límite elástico; gran tenacidad, resistencia a la corrosión a temperatura ambiente y una alta resistencia a elevadas temperaturas. Además, tiene capacidad para formar aleaciones incluyendo aluminio, manganeso o molibdeno, entre otros, que le transfieren mejores propiedades como mejor templabilidad resistencia o maquinabilidad [29] y [30].

Por el contrario, existen razones de peso que hacen que no sea el material más utilizado en la industria de la bicicleta. Algunas de ellas son su elevado coste, su difícil mecanización y, la más crítica de todas, su alta reactividad química a elevadas temperaturas con el oxígeno o el nitrógeno entre otros. Esta última produce fragilización que reduce la ductilidad y tenacidad del titanio; y es ocasionada por la alotropía del material ya que a temperatura superior a los 800°C su estructura cristalina lo hace dúctil y al disminuir, cambia su estructura cristalina y pasa a ser frágil y aumenta su sensibilidad a la corrosión.

A pesar de sus desventajas, existen en el mercado bicicletas con cuadros de titanio por su buena relación ligereza-precio y elevada resistencia a la corrosión. Aunque son la inmensa mayoría de las marcas las que no tienen bicicletas de titanio en sus catálogos por el elevado coste y la complejidad de fabricación, en concreto, su soldabilidad. Al tener un elevado punto de fusión (funde a 1668°C) y una alta reactividad química, el proceso de soldadura se debe llevar a cabo en cámaras de vacío, en ausencia de oxígeno, nitrógeno y otros compuestos que puedan precipitar en la unión y, por tanto, fragilizar el producto final.

Cabe destacar que se utiliza en aplicaciones de tornillería ligera, por sus excelentes propiedades contra la corrosión a temperatura ambiente, y porque con un bajo peso es capaz de soportar cargas elevadas. Aunque no son muchos los modelos de bicicletas hechos de titanio, con la aparición de la impresión 3D se han conseguido fabricar cuadros como el de la Figura 3.26, en la que se muestra el cuadro de titanio impreso por la empresa Renishaw para Empire cycles; y en la Figura 3.27 se puede observar la colocación de las diferentes partes a la salida de la impresora [31] y [32].



Figura 3.26. Cuadro de titanio impreso en 3d. [31]



Figura 3.27. Piezas del cuadro de titanio impreso en 3d. [32]

### 3.4.3. Aluminio

El aluminio es uno de los metales más abundantes en la tierra, se obtiene a partir de la bauxita que se encuentra fácilmente en la corteza terrestre; y es el material más utilizado en la industria de la bicicleta en la actualidad, por sus buenas propiedades mecánicas. Se emplea en la mayor parte de los componentes de la bicicleta. En la industria se utilizan aleaciones que mejoran las propiedades del material ya que es un material blando que no sería viable en la aplicación de no ser por algunas de sus aleaciones.

Las principales propiedades del aluminio son una elevada resistencia para su bajo peso (elevada resistencia específica), alta resistencia a la corrosión, altas conductividades térmica y eléctrica, y buena maquinabilidad. El único inconveniente es que no trabaja bien a elevadas temperaturas debido a su bajo punto de fusión (660°C) [29] y [30].

Las aleaciones del aluminio se clasifican en función de su composición y el elemento aleante, se distinguen por un código de cuatro dígitos en los que el primero indica el aleante; el segundo, modificaciones a la aleación; y los dos últimos, el porcentaje de aluminio. En el caso de tener una aleación 1090, tenemos una aleación de aluminio puro con 99.9% de aluminio y no presenta impurezas. El primer dígito asciende desde el 1 hasta el 9, aunque el 8 y el 9 apenas se utilizan; respectivamente: aluminio puro (1), cobre (2), manganeso (3), silicio (4), magnesio (5), magnesio-silicio (6) y zinc (7).

Las más utilizadas en el sector son la 6xxx y la 7xxx. La aleación 6xxx corresponde a una aleación con magnesio-silicio, lo que otorga al aluminio una resistencia media, buena maquinabilidad, soldabilidad, formabilidad y resistencia a la corrosión, además de hacerlo más fácilmente tratable térmicamente. Por otro lado, la aleación 7xxx le proporciona una elevada resistencia y permite que sea tratado térmicamente.

Además de esta denominación numérica, se tiene una denominación alfabética que hace referencia al temple del aluminio. La F indica cómo se fabrica (en frío o caliente, o por fundición); la O, recocido; H, endurecido por deformación al ser trabajado en frío; T, tratado térmicamente; y W, solo tratado con soluciones. De todas ellas, la empleada en la industria es la T6, que consiste en un temple mediante tratamiento térmico, enfriado al agua tras extruir y con envejecimiento artificial; esto le proporciona endurecimiento por tratamiento térmico lo que mejora sus propiedades.

Como se ha comentado, las aleaciones más utilizadas en la industria de la bicicleta son las series 6xxx y 7xxx; en concreto, de forma mayoritaria la 6061 y 7005, aunque también las 6063, 6066 o 7075, la última sobre todo en componentes ya que no es soldable y por tanto la geometría deseada se consigue por mecanizado. No sólo se utilizan en la fabricación de los cuadros, también en la realización de moldes y maquinaria específica. En comparación, el 7005 es más fácil de tratar y fabricar que el 6061, por tanto, permite obtener geometrías más precisas mediante hidroformado o conificado; aunque el 6061 es más duro y resistente pero no tan flexible como el 7005.

### **3.4.4. Compuestos de fibra de carbono**

Un material compuesto es una combinación de dos o más materiales con distintas propiedades, para fabricar otro que mejora dichas propiedades sin alterar su composición química. Para este caso, se tienen materiales compuestos de fibras, conocidos como plásticos reforzados con fibras (FRP) o materiales compuestos de matriz polimérica (PMC) [33].

Las fibras mejoran las propiedades de rigidez, resistencia, y resistencia a la termofluencia de los plásticos, en concreto su resistencia y rigidez específicas (respectivamente, relación resistencia-peso y rigidez-peso). Mientras que los plásticos aportan consistencia a las fibras y dan forma al producto final. Estos materiales reforzados mejoran también la tenacidad y la resistencia a fatiga.

Estos materiales compuestos son altamente anisotrópicos, sus propiedades varían en función de la dirección en que son evaluadas. Esto se debe a que las fibras carecen de valor estructural, poseen alta rigidez en la dirección longitudinal, pero no presentan resistencia en su dirección transversal. Y la matriz formada por el componente plástico es menos rígida y fuerte que la fibra, pero más tenaz.

Los compuestos utilizados en la industria de la bicicleta son las fibras de grafito, más conocidas como fibras de carbono, por su baja densidad, bajo coste en comparación con otras fibras, y su elevada resistencia. Y como matriz polimérica, que otorga consistencia a éstas, se utiliza el polímero termoestable conocido como resina epoxi. Ambos componentes se unen en un mismo material compuesto por un porcentaje de fibras de entre el 10 y el 60%, ya que con valores superiores al 65% se obtienen peores propiedades estructurales.

### - **Fibras de carbono**

Las fibras de carbono se obtienen, generalmente, a partir del polímero denominado poliacrilonitrilo (PAN), a partir de un proceso de pirolisis, aunque también se pueden obtener de la brea o el rayón. Este proceso consiste en una oxidación controlada y una carbonización a alta temperatura; en general, es un complejo proceso de calentamiento en el que las fibras de PAN se van tratando hasta conseguir fibras de carbono.

Se pueden clasificar en función del material del que proceden las fibras, ya sea poliacrilonitrilo, rayón o, brea con diferentes fases: brea isotrópica, brea en meso-fase. En función de la temperatura alcanzada en el tratamiento térmico final: tipo I, se alcanzan temperaturas superiores a 2000°C; tipo II, alrededor de los 1500°C; y tipo III, en torno a los 1000°C.

Otro método de clasificación se considera en función del tejido, con la denominación xK, siendo x un número que hace referencia al espesor del tejido en milímetros y K, que se refiere a las 1000 fibras de carbono que componen un hilo. Entonces se tienen 1K, 3K, 6K, 12K, 24K y 50K, donde la más común es 3K; además estos tejidos se suelen configurar con distintos patrones de entrelazado, como el satén. El satén 4, por ejemplo, consistiría en un tejido en el que el hilo horizontal cruza tres verticales por encima y uno por abajo, y así sucesivamente [34].

En función de la temperatura alcanzada a lo largo del proceso de obtención de la fibra se tienen distintos tipos [35]:

- Fibras de alto módulo (HMF, high modulus): presentan un módulo elástico elevado, en torno a 400 GPa, incluso superior a esta cifra que son las denominadas fibras de ultra alto modulo (UHM, ultra high modulus); y un alargamiento a la rotura bajo. Son las más rígidas y necesitan una temperatura mayor en el tratamiento. Además, su obtención supone un coste elevado.
- Fibras de módulo intermedio (IM, intermediate modulus): presentan un módulo elástico no tan elevado como las fibras de alto módulo, pero en comparación con, las de alta resistencia, sí, en torno a 300 GPa. No suponen un coste tan elevado en comparación a las de alto módulo.
- Fibras de alta tenacidad (HT): presentan un módulo de elasticidad bajo, en torno a 100 GPa, y una elevada resistencia a la tracción, de 4 GPa, incluso se pueden obtener fibras con resistencia a la tracción de más de 4.5 GPa que son las denominadas fibras de súper alta resistencia (SHT).

### - **Matriz epoxi**

La matriz de los materiales compuestos reforzados con fibras tiene tres principales funciones:

- Mantener la cohesión entre las fibras y transferir los esfuerzos a éstas soportando un elevado porcentaje de la carga.
- Proteger las fibras contra daños físicos, como impactos, y daños ambientales. Puesto que son materiales altamente resistentes a la corrosión.

- Disminuir la propagación de grietas en el material compuesto. Lo que se consigue mediante un aumento de la rigidez y ductilidad de la matriz plástica.

Los materiales utilizados en la matriz son termoplásticos y termoestables, generalmente, los epóxidos y poliésteres.

### 3.4.5.Fibra de basalto

Como elemento nunca antes visto en el mundo del ciclismo, la fibra de basalto ha sido introducida en 2015 por la empresa española Racormance, formada por ingenieros españoles. Utilizan la fibra de basalto para dotar de mayor confort a la bicicleta. Entre otras aplicaciones, este material se utiliza para elaborar fibras textiles resistentes al fuego, en aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales, y en refuerzos estructurales [36].

El material presenta buenas propiedades mecánicas y en absorción de impactos y vibraciones, es por esto que la empresa la combina con la fibra de carbono para lograr un rendimiento óptimo sin penalizar el confort del usuario. El cuadro está compuesto de fibras de basalto en su parte superior, denominada confort zone, para proporcionar el extra de confort, y de fibras de carbono en su parte inferior, denominada power zone. En la Figura 3.28 se pueden ver las dos zonas de fibras del cuadro.



Figura 3.28. Bicicleta Racormance fibras de basalto y carbono. [36]

Debido a su reciente creación no se tienen suficientes datos para determinar el futuro de este material en la industria, pero quizá sea conveniente investigar en otros materiales compuestos que mejoren las propiedades de los existentes.

### 3.4.6. Grafeno

El grafeno es el material que pretende convertirse en el futuro de muchas industrias, y la de la bicicleta ya se ha visto afectada por él. La empresa británica Dassi Bikes ha logrado introducirlo y ha producido el primer cuadro que contiene fibras de carbono y grafeno, pesa 750 gramos y aseguran que en no mucho tiempo se podrían lograr cuadros de 350 gramos [9].

Las propiedades de este material son excelentes, se estima que 200 veces más duro que el acero e igual de duro que el diamante (tiene un límite elástico de 1000 GPa), elevadas flexibilidad y elasticidad, y gran ligereza. Sin embargo, su elevado coste, tanto de obtención como de procesamiento dificulta su introducción en el mercado.

Este material utilizado por Dassi Bikes apenas presenta el 1% del material del cuadro, combinado con la resina epoxi y fibras de carbono. Su coste hace que sea inviable la fabricación de un producto combinando únicamente la matriz con las fibras de grafeno.

### **3.5. Técnicas de fabricación**

Debido a que el material y la técnica de fabricación son, en la mayoría de los casos, los factores que limitan el diseño de un producto, en este apartado se comentarán las principales técnicas de fabricación de cuadros de bicicleta, con el objetivo de justificar los diseños a realizar. En sus inicios, partieron de un conjunto de tubos soldados y en la actualidad, gracias al avance de la técnica en la industria, existen diversas técnicas de fabricación para cada tipo de material.

En el presente proyecto se centrará la atención en los materiales más utilizados para la construcción de bicicletas, que son el aluminio y los materiales compuestos de fibra de carbono.

#### **3.5.1. Fabricación con tubos soldados**

En el caso del presente proyecto, en este método de fabricación, se particularizará para la fabricación con tubos de aluminio soldados.

En primer lugar, para las bicicletas de aluminio se emplean tubos de este material que son moldeados en prensas y unidos mediante soldaduras. La alta capacidad del aluminio para ser moldeado permite obtener tubos de diferentes secciones, aspecto crucial para otorgar a cada tubo del cuadro las características geométricas necesarias. El tubo de aluminio se obtiene mediante un proceso de extrusión, en el que un bloque o tocho de dicho material se hace pasar, precalentado a temperaturas entorno a los 500°C y a alta presión, a través de una matriz cuya abertura corresponde con la forma de la sección transversal deseada. Posteriormente estos tubos son cortados y tratados térmicamente con el fin de mejorar las propiedades del producto final. Este proceso de extrusión es también denominado conformado de tubos [37].

La evolución en la industria del proceso de conformado fue la aparición del hidroconformado. Este conjunto de técnicas surge como alternativa al conformado convencional por razones de mejora de las condiciones de proceso, como puede ser la reducción de las fuerzas de fricción, una mayor flexibilidad en el proceso debida a la simplificación de utillajes, además las piezas presentan una mejor precisión, y se consigue la obtención de piezas más complejas, que con el conformado convencional sería imposible producir.

El proceso de hidroconformado se muestra en la Figura 3.29 y se describe de la siguiente manera: en primer lugar se introduce un tubo recto preformado en la matriz que contiene la geometría deseada (a), posteriormente la matriz se cierra mediante un proceso hidráulico que conforma de manera mecánica el tubo (b), a continuación los punzones de sellado cierran el interior del tubo y comienza el llenado del mismo con agua o emulsiones de agua y aceite (c), después el material se expande por acción del líquido presurizado que contiene el interior del tubo al mismo tiempo que los punzones avanzan ejerciendo una fuerza de compresión en dirección axial (d, e) y por último se extrae la pieza hidroformada (f) [38].

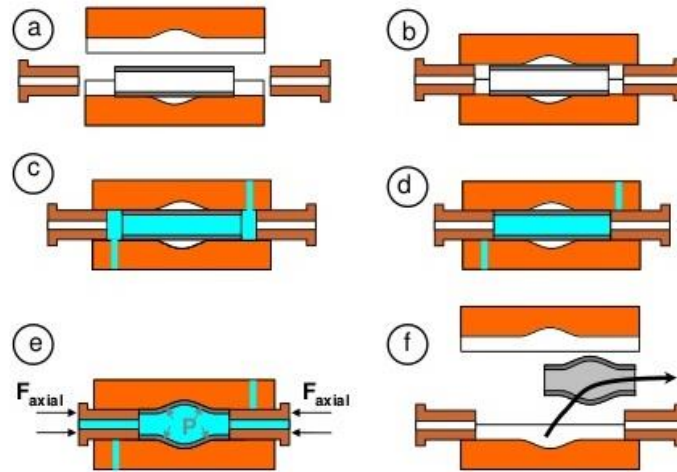


Figura 3.29. Proceso de hidroconformado. [38]

Las ventajas que hacen del hidroconformado una mejor opción de fabricación que el conformado convencional son:

- Libertad de diseño para la fabricación de piezas complejas.
- Mayor resistencia mecánica y durabilidad.
- Posibilidad de reducir las uniones soldadas debido a la opción de fabricar una pieza con la misma forma que tendrían varios tubos conformados y soldados.
- Reducción del peso de la pieza, optimizando el espesor de los tubos, incluso consiguiendo variaciones del espesor en la misma pieza.
- Ahorro en el material, esta técnica genera menos desperdicio que el conformado convencional.

A pesar de sus ventajas, el hidroconformado presenta desventajas o razones por las que su uso está limitado:

- El coste inicial de maquinaria es mayor que en el conformado convencional lo que requiere la obtención de un número mayor de piezas para rentabilizar la inversión.
- En caso de no poder realizar una geometría demasiado compleja que requiera la unión mediante soldadura con otras partes, hace que el proceso de soldadura por puntos sea más complejo que el mismo proceso con tubos conformados de manera convencional.
- Tiene una baja productividad y un elevado tiempo de ciclo.

Además del hidroconformado, una técnica capaz de reducir el peso del cuadro de la bicicleta es el conificado de los tubos, que permite la existencia de diferentes espesores a lo largo del tubo. Dotando a las zonas del cuadro más débiles de un mayor espesor para alcanzar una resistencia mayor sin necesidad de sobredimensionar el tubo y añadir peso de manera innecesaria. Las zonas más débiles suelen ser las uniones, por tanto,

mediante el conificado se suelen obtener mayores espesores en los extremos de los tubos.

Una vez obtenidos los tubos y cortados de manera que conformen el cuadro, se montan en un molde para proceder con la soldadura. Este es, quizá, el proceso más complicado ya que la fusión del material implica la posibilidad de variación en las propiedades mecánicas del material a soldar, en este caso aluminio.

Se deben tener en cuenta algunos factores en relación a la soldadura [37] :

- No todas las aleaciones de aluminio son soldables, y además es necesario que sea tratable térmicamente para poder mejorar las propiedades de la unión al finalizar el proceso de soldadura mediante un tratamiento adecuado.
- Al proceso de soldadura va asociado un debilitamiento del aluminio. Debido a la alta conductividad térmica del mismo, aumenta la zona afectada por el calor (la que se debilita). En comparación con la soldadura de acero o titanio para cuadros de bicicleta; el aluminio presenta una baja temperatura de fusión, que unido a un espesor mayor de los tubos, requiere un aporte de energía similar al de la soldadura en acero o titanio, obteniendo una zona afectada más amplia.
- Su alta conductividad térmica y su baja densidad hacen que se enfríe rápidamente, y sea muy fácil que queden atrapadas burbujas de gas en el cordón de soldadura lo que hace que se debilite en exceso la unión.
- Este rápido enfriamiento puede provocar también que la zona más cercana al cordón de soldadura solidifique de diferente manera que la más alejada produciendo tensiones internas que pueden llegar a debilitar el material. Esto se puede agravar en zonas en las que se unen piezas de distinto espesor.

El método de soldadura que menos riesgo entraña para la soldadura de aluminio es el TIG (del inglés Tungsten Insert Gas). En este método el metal de aporte es suministrado en forma de alambre y es similar al metal a soldar. Es un método de soldadura mediante arco eléctrico en el que se emplea un electrodo de wolframio, el arco se establece entre el electrodo y la pieza a soldar, cubriéndolo con un gas inerte que evite el contacto con la atmósfera y la posible inserción de gases en el cordón de soldadura. Se emplea uniones con espesores de entre 1 y 5 milímetros. En la Figura 3.30 se muestra esquematizado el proceso de soldadura TIG [33].

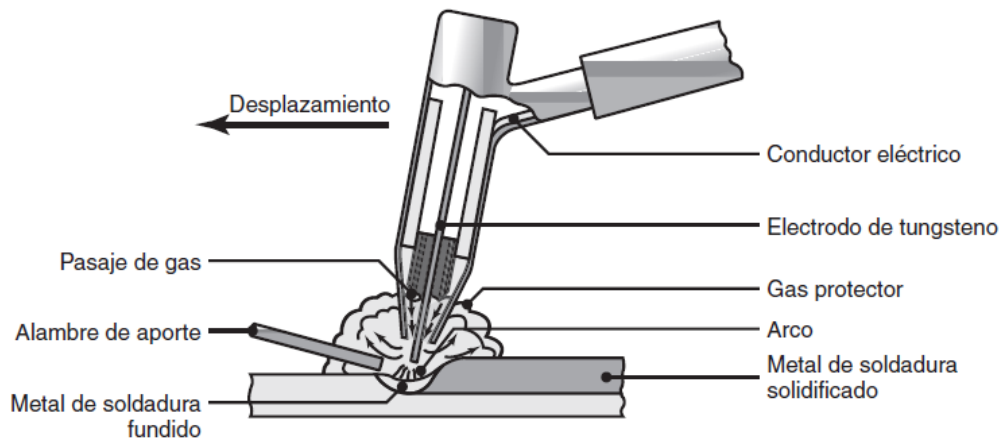


Figura 3.30. Dispositivo de soldadura TIG. [33]



### 3.5.2. Fabricación con materiales compuestos de fibras

Para los cuadros de fibra de carbono existen dos métodos diferenciados de fabricación, mediante racores y tubos, y la fabricación en monocasco. Con la fabricación en fibra de carbono se persigue el mínimo peso y la máxima resistencia mecánica; y, a diferencia de los procesos de fabricación de cuadros de aluminio, con la fibra de carbono no hay limitación geométrica en el diseño, al menos en el caso del monocasco.

Los procesos de fabricación con fibras de carbono comienzan con la configuración de las fibras en láminas. Dichas láminas se componen de fibras entrelazadas o no en diferentes direcciones y unidas entre sí gracias a la matriz de polímero. La dirección de las fibras se diseña para asegurar el mínimo peso y la máxima resistencia [39].

Una vez configuradas las láminas, una cortadora CNC (control numérico por computadora) es la encargada de cortar la lámina en distintas piezas, con diferentes geometrías, que irán formando cada una de las partes. Es común en los cuadros de alto rendimiento que estén formados por cientos de piezas de distinta geometría. En algunos casos con las piezas obtenidas se fabrican capas, en otros se monta el laminado sobre el molde directamente. Por ejemplo, en el caso de la marca SCOTT, se preparan las capas para el posterior montaje.

A continuación, se montan las piezas sobre una preforma, de forma manual, que posteriormente se introducirá en el molde. En el caso de la marca SCOTT, se utiliza un proceso desarrollado por ingenieros de la marca al que denominan IMP (Integrated Modeling Process). En la Figura 3.31 se puede observar la preforma sobre la que se montan las capas y en la Figura 3.32, esa misma preforma con las capas colocadas en el interior del molde.



*Figura 3.31. Preforma cuadro de carbono Scott. [39]*



*Figura 3.32. Molde cuadro de carbono Scott. [39]*

Antes de introducir en el molde se emplea un agente desmoldeante para evitar problemas de desmoldeo. Se cierra el molde y se aplica alta presión y alta temperatura para conseguir las especificaciones de resistencia requeridas. Por último, se extrae la pieza, y se le aplica el proceso final de acabado en el que se lija y se mecaniza si es necesario para cumplir las tolerancias.

En el caso de la fabricación mediante racores y tubos, se producen los mismos pasos hasta el desmoldeo, y, tras éste, se procede a unir las piezas insertando los racores en los tubos y uniéndolos mediante resinas y nuevas láminas de carbono. En la Figura 3.33 se muestra un racor que une las vainas, el tubo del sillín y el tubo inferior [40].



*Figura 3.33. Racor de fibra de carbono. [40]*

### **3.5.3. Fabricación mediante deposición aditiva de material**

Uno de los últimos avances en la industria en general ha sido la fabricación mediante deposición aditiva de material, y, a medida que pasa el tiempo se está implantando en diversos sectores del mercado como el de la automoción, la medicina, la aeronáutica y muchos más sectores. Como ya se ha comentado, en la industria de la bicicleta ya hay prototipos como el de la empresa Renishaw, que acercan esta tecnología al mercado de la bicicleta.

Para el caso del proyecto, se estudiará la aplicación de este método de fabricación con metales, ya que se requiere un material con gran resistencia estructural y que, además, tenga una elevada relación resistencia-peso. Puede ser una solución a los problemas

presentes en los métodos de fabricación expuestos anteriormente (fabricación mediante tubos de aluminio soldado, y fabricación en fibra de carbono).

Una buena opción sería el aluminio, en presencia de un gas inerte para evitar la aparición de gases que puedan producir poros en el material en el momento del enfriamiento. Su baja temperatura de fusión y relación resistencia-peso le hacen un buen candidato, aunque su elevada conductividad térmica no juega su favor.

Una vez seleccionado el posible material, cabe destacar que existen diversos tipos fabricación aditiva con metales, entre ellas, las tres más utilizadas en metales son [41]:

- Selective Laser Melting (SLM) (Fusión selectiva por láser): en esta técnica se deposita una capa de polvo metálico sobre una cuba y se incide con un láser produciendo la fusión del metal, a continuación, la cuba se mueve hacia debajo para aplicar una nueva capa de polvo e ir conformando la pieza, se repite este proceso hasta alcanzar la pieza final. En esta técnica se emplean acero, titanio, aluminio o níquel; y se obtienen piezas de gran densidad con una resistencia adecuada, y con un acabado muy próximo al acabado final.
- Electron Beam Melting (EBM) (Sinterizado de polvo metálico por haz de electrones): en esta técnica se van depositando capas de polvo que, tras la incidencia de un haz de electrones como fuente de energía, van dando forma a la pieza. La producción se realiza en vacío evitando la posible contaminación del metal lo que evita utilizar gases inertes adicionales y permite utilizar metales afines al oxígeno. Al presentar la cámara de vacío y el material caliente antes del proceso, se evitan tratamientos térmicos posteriores que recuperen las propiedades del material. Esta técnica es aplicable a una amplia gama de metales entre los que se encuentra el titanio o el níquel.
- Laser metal deposition (LMD): en esta técnica se utiliza un láser o un haz de electrones que proyecta polvo metálico y va formando una masa de metal fundido sobre la superficie de un sustrato base. Únicamente se funde una capa de dicho sustrato de más de 50 micrómetros de altura. Esta técnica se suele utilizar para reparaciones o dotar a las piezas de protección contra la corrosión y el desgaste. Se puede utilizar, como material de aporte, polvo cerámico o metálico.

Algunas de las ventajas que presenta este método de fabricación respecto a los anteriores (fabricación en tubos de aluminio mediante soldadura y fabricación en fibra de carbono) son:

- que permite fabricar piezas con geometrías complejas.
- se reducen los costes de utillaje, además de los errores de montaje y sus costes.
- presenta un menor impacto medioambiental, permite fabricar piezas compuesta de dos o más materiales.

A pesar de las ventajas presenta algunos inconvenientes:

- la disponibilidad de materiales es limitada y su coste elevado.

- el tamaño de las piezas es limitado, sobre todo en las que se requiere una cámara de vacío o de gases inertes.
- los equipos que utilizan esta tecnología requieren una inversión elevada.

### 3.6. Marco regulador

En primer lugar, hay que mencionar la procedencia de las normas utilizadas. Dichas normas son normas UNE (Una Norma Española), documentos técnicos de aplicación voluntaria que se han desarrollado en base a los resultados y experiencias del desarrollo tecnológico y han sido aprobados por un organismo reconocido; en este caso dicho organismo es AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). AENOR es un organismo reconocido tanto en el ámbito nacional como el internacional.

Para el correcto desarrollo del proyecto se han utilizado dos principales normas, la UNE-EN 15532 de 2009 [42] y la UNE-EN ISO 4210 de 2014. En la primera se establece la descripción de los términos y símbolos utilizados para definir la bicicleta; y la segunda, es una traducción de la norma ISO correspondiente, que establece los requisitos de seguridad para ciclos, y se divide en las siguientes partes:

- UNE EN ISO-4210-1: 2014. Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Términos y definiciones. [43]
- UNE EN ISO-4210-2: 2015. Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Requisitos para bicicletas de paseo, para adultos jóvenes, de montaña y de carreras. [44]
- UNE EN ISO-4210-3: 2014. Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Métodos de ensayo comunes. [45]
- UNE EN ISO-4210-4: 2014. Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Métodos de ensayo de frenado. [46]
- UNE EN ISO-4210-5: 2014. Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Métodos de ensayo de dirección. [47]
- UNE EN ISO-4210-6: 2015. Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Métodos de ensayo del cuadro y la horquilla. [48]
- UNE EN ISO-4210-7: 2014. Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Métodos de ensayo para ruedas y llantas. [49]
- UNE EN ISO-4210-8: 2014. Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Métodos de ensayo para los pedales y el sistema de transmisión. [50]
- UNE EN ISO-4210-9: 2014. Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Métodos de ensayo para los sillines y las tijas. [51]

De las cuales se utilizará la parte 1 para la definición de términos específicos referentes a los ensayos de los cuadros; la parte 2, para definir los requisitos que debe cumplir un cuadro para superar el ensayo realizado; la parte 3, para definir las fuerzas y el comportamiento de las mismas durante los ensayos de fatiga; y, por último, la parte 6, de la que se extraerán los métodos de ensayo del cuadro. El resto de partes no son aplicables al proyecto.

## **4. MODELADO**

---

### **4.1. Geometría**

En este apartado se tratarán los aspectos más relevantes a tener en cuenta en el diseño de un cuadro de bicicleta de montaña. Se tomarán como punto de partida otros cuadros de marcas consolidadas de los que se conoce las medidas y el peso estimado de los mismos.

Con el objetivo de adaptar la bicicleta lo máximo posible al ciclista, las marcas de bicicletas elaboran una talla distinta dentro de cada modelo. Las marcas más importantes suelen tener hasta 5 tallas distintas que van desde la XS (Extrasmall), hasta la XL (Extralarge), pasando por la S (Small), M (Medium), y L (Large). Cada talla es adecuada para un ciclista distinto. Otras marcas menos reconocidas suelen fabricar únicamente 3 tallas, S, M, y L.

La fabricación de varias tallas del mismo modelo supone que en una empresa con diferentes modelos, se acarreen mayores gastos de fabricación (se requieren más moldes), y se requiera de un almacén de mayores dimensiones para almacenar los productos fabricados, es decir, un mayor gasto de stock. Es por esto que existen empresas que no realizan muchas tallas, sino que diseñan bicicletas más versátiles, adaptables a un mayor número de usuarios; y otras, que optan por la personalización al máximo, con un elevado número de tallas. Gracias a la producción Just In Time, cada vez las marcas incluyen más tallas e incluso permiten la personalización de las bicicletas por parte del cliente, sobre todo en la gama alta.

#### **4.1.1. Biomecánica**

Estas tallas tratan de adaptarse a la fisionomía del ciclista mediante medidas biomecánicas coherentes con las normas biomecánicas correspondientes. Además, gracias a estudios biomecánicos individualizados, en los que se corrige la posición del ciclista sobre la bicicleta, mediante el cambio de potencia (tanto de longitud como de ángulo de la misma), o la modificación del sillín (tanto en altura como de avance-retroceso, o inclinación); se puede conseguir aumentar el confort del usuario, así como maximizar el rendimiento de la pedalada.

Las medidas biomecánicas utilizadas son, en la mayoría de los casos, medidas de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 7250-1 [52]. Se suele tener en cuenta la altura del usuario, su altura de entrepierna y su longitud de antebrazo, como se muestra en la Figura 4.1, de izquierda a derecha respectivamente. Medidas respectivamente, como se indica en la norma, distancia vertical del suelo al punto más alto de la cabeza, distancia vertical desde el suelo hasta la parte distal de la rama inferior del pubis, y distancia horizontal desde el codo hasta la punta de los dedos con el antebrazo flexionado 90°.

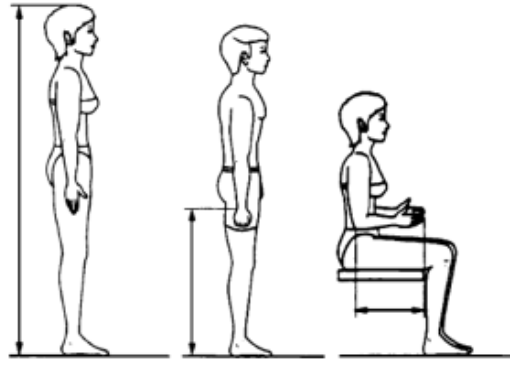


Figura 4.1. Medidas biomecánicas para seleccionar la talla de bicicleta. [52]

### 4.1.2. Aspectos clave de diseño

A continuación, se tratarán los aspectos más relevantes en el proceso de diseño de un cuadro de bicicleta de montaña. Éstos determinarán el comportamiento de la bicicleta, así como su geometría.

- **Ángulo del tubo de dirección**

El ángulo de dirección es el ángulo que forma el tubo frontal del cuadro con la horizontal [53]. De él depende la inclinación de la horquilla, por lo que, ángulos inferiores a  $90^\circ$  posicionarán la horquilla por delante del cuadro como se muestra en la Figura 4.2.

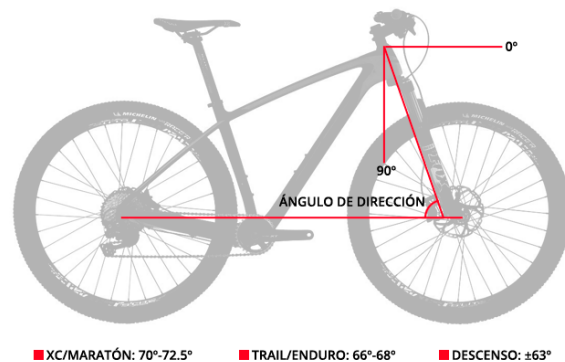


Figura 4.2. Ángulo de dirección. [53]

Este ángulo permite diferenciar la modalidad de ciclismo de montaña para la que está diseñado el modelo. Generalmente en XC se utilizan ángulos de valores  $69^\circ$  hasta  $73^\circ$ , en downhill en torno a los  $63^\circ$  y en enduro, entre  $66^\circ$  y  $68^\circ$ . Ángulos mayores corresponderán a ángulos más cerrados y, los menores a ángulos más abiertos.

Un ángulo cerrado sitúa la horquilla más cerca del centro de gravedad de la bicicleta, y hace que la rueda delantera se mantenga más tiempo en contacto con el suelo en los ascensos críticos. Sin embargo, en los descensos más inclinados hace que la horquilla no trabaje en su dirección longitudinal, si no, con una ligera excentricidad y se requiera de gran pericia en este tipo de descensos. Por esto, las bicicletas con ángulos cerrados se denominan escaladoras y suelen estar vinculadas al xc.

Un ángulo abierto, aleja la rueda delantera del centro de gravedad y el ciclista adopta una posición retrasada respecto de este punto. Debido a esto, bicicletas con estos

ángulos son ineficientes en los ascensos, ya que tienden a retrasar aún más el centro de gravedad y con ello aumenta la posibilidad de elevar la rueda delantera; aunque son muy eficientes en los descensos porque la horquilla trabaja en su dirección longitudinal en los descensos de pendiente elevada. Por esto, los ángulos abiertos se utilizan en el downhill.

- **Ángulo del tubo del sillín**

El ángulo del tubo del sillín es el ángulo formado por el tubo del sillín y la horizontal, como se observa en la Figura 4.3. Junto con el ángulo del tubo frontal es el encargado de posicionar al ciclista sobre la bicicleta y posiciona el centro de gravedad de la misma. Afecta a la pedalada y por tanto al rendimiento del ciclista [54].



Figura 4.3. Ángulo del sillín. [54]

Este ángulo se encuentra entre  $72^{\circ}$  y  $74^{\circ}$  sin importar la modalidad de ciclismo de montaña, a diferencia del ángulo de dirección. Valores más cercanos a  $74^{\circ}$  permiten adelantar el centro de gravedad y cargar más la rueda delantera, obteniendo una geometría más escaladora; por otro lado, valores más cercanos a  $72^{\circ}$  retrasan el centro de gravedad, aumentan la carga en el eje trasero y la liberan en el delantero. De forma general, las bicicletas de XC suelen tener un ángulo de  $73.5^{\circ}$ .

- **Longitud de las vainas**

Es la distancia desde el centro de la rueda al centro de la caja de pedalier como se puede ver en la Figura 4.4. La tendencia es la de acortar la vainas todo lo posible. Son las encargadas de determinar el manejo de la bicicleta, con vainas más largas se tienen bicicletas más largas, estables y difíciles de manejar en senderos revirados. Vainas más cortas suponen bicicletas más cortas y manejables, además, la rueda trasera recibe mayor carga y aumenta su tracción [55].





Figura 4.4. Longitud de las vainas. [55]

Modelizando la vaina como una viga en voladizo con una carga puntual en su extremo, como la de la Figura 4.5. Utilizando las ecuaciones descritas a continuación, se obtiene que un aumento de longitud supondrá una disminución de la rigidez; es por esto que la tendencia sea acortar las vainas.

$$F = k \cdot \delta \quad [4.1]$$

$$\delta = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad [4.2]$$

$$k = \frac{3 \cdot EI}{L^3} \quad [4.3]$$

Donde:

- $F$ : Fuerza aplicada en el extremo
- $\delta$ : Flecha en el extremo
- $E$ : Módulo de elasticidad del material
- $I$ : Momento de inercia de la sección de la viga
- $L$ : Longitud de la viga
- $k$ : Rigidez de la viga

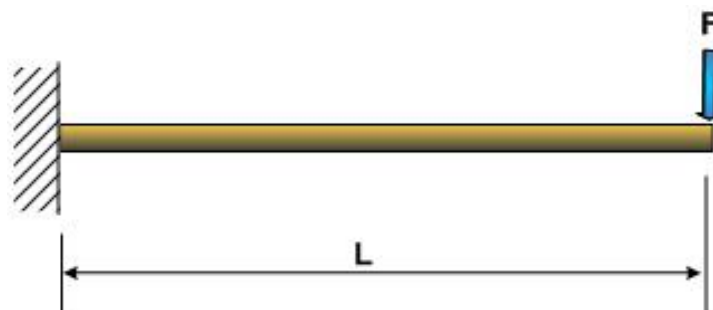


Figura 4.5. Viga en voladizo.

- **Reach y Stack**

El reach y el stack son medidas para determinar la talla de la bicicleta con mayor precisión. Surgieron a raíz de la aparición de los tubos sloping, tubos no rectos a diferencia de los que habían dominado el sector hasta la aparición de éstos. Hasta ese momento bastaba con medir la longitud de los tubos para conocer la talla de bicicleta.

El reach es la medida horizontal desde la parte superior del tubo de dirección hasta el centro del eje pedalier; y el stack es la misma medida, pero en vertical. En la Figura 4.6 se pueden ver las distancias medidas [56] y [57].



Figura 4.6. Medidas de reach y stack. [56]

El reach y el stack determinan, respectivamente, el alcance y la altura del cuadro. A mayor reach, se consigue mayor longitud del tubo superior; y a mayor stack, mayor altura del manillar. Estas medidas no modifican el comportamiento de la bicicleta, pero sí la posición del ciclista.

Existen medidas de reach y stack que no se pueden sobrepasar por motivos de espacio en el diseño, y de seguridad. En el caso del primero no se pueden alcanzar valores inferiores a 390 milímetros, ya que podría colisionar la zapatilla con la rueda en los giros propiciando la caída del ciclista. Y, en el caso del segundo, no se pueden alcanzar valores inferiores a 600 milímetros que permitan introducir una horquilla típica de 100 milímetros de recorrido, con ruedas de 29 pulgadas y una altura del eje de pedalier lógica. Por estos motivos, el diseño de una bicicleta de talla pequeña (talla S), resulta un trabajo arduo y escabroso.

- **Altura del eje pedalier**

La altura del eje de pedalier es la distancia desde el centro de la caja de pedalier al suelo, como se muestra en la Figura 4.7. es conveniente no confundir esta medida con la caída del eje pedalier, que es la distancia vertical entre los ejes de rueda y el eje pedalier; ésta es la medida que suelen dar los fabricantes ya que la altura del eje pedalier se podría ver modificada en función del ancho de rueda utilizado [58].

Una altura más baja supondrá mayor estabilidad de la bicicleta porque el centro de gravedad se situará más próximo al suelo, aunque reducirá la distancia de paso entre cuadro y obstáculo. Por otro lado, una altura mayor supondrá mejor paso de obstáculos y verá penalizada la estabilidad. Se suelen utilizar alturas menores para XC y mayores para downhill.



Figura 4.7. Altura del eje de pedalier. [58]

- **Batalla o longitud entre ejes**

La batalla es la medida desde el centro del eje de la rueda delantera hasta el centro del eje de la trasera como se observa en la Figura 4.8. La medida será determinada por el reach, la longitud de las vainas, el ángulo del tubo de dirección y el tamaño de la rueda [59].

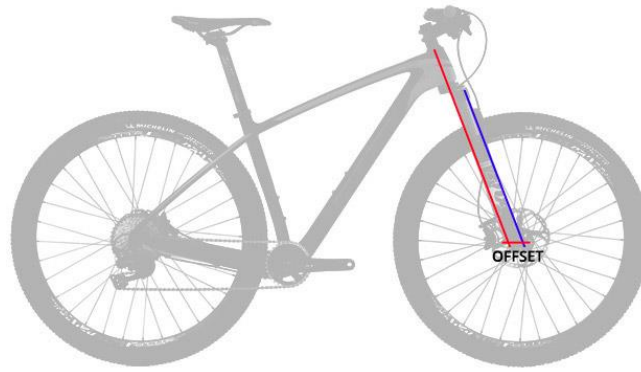


Figura 4.8. Batalla o longitud entre ejes. [59]

Una bicicleta de mayor batalla supone una bicicleta menos rígida, más estable y confortable. Una menor batalla hace que la bicicleta sea más reactiva, compacta y rígida. Las bicicletas de XC suelen tener una batalla más corta para conseguir mayor rigidez y reactividad; y modelos de downhill presentan batallas más largas para obtener mayor estabilidad y porque presentan ángulos de dirección más abiertos.

- **Offset de la horquilla**

El offset o avance de la horquilla es la distancia entre el eje del tubo de dirección y una paralela al mismo que pasa por el eje de la rueda delantera, es decir, la distancia entre el eje de giro de la dirección y el eje de giro de la rueda. Con esta medida se trata de reducir o aumentar el trail de la horquilla, que viene determinado por el ángulo de dirección. En la Figura 4.9 se muestra la medida del offset de una bicicleta [60].



*Figura 4.9. Medida del offset. [60]*

- **Trail de la horquilla**

El trail mide la distancia paralela al suelo que existe entre el eje de dirección de la bicicleta y la perpendicular al suelo del eje de la rueda. En la Figura 4.10 se puede observar esta medida. El objetivo que persigue esta medida es lograr una mayor estabilidad en línea recta de la bicicleta. Cuanto mayor sea el trail mayor es la estabilidad de la bicicleta a altas velocidades; mientras que cuanto menor sea, mayor es la manejabilidad y la rapidez de reacción de la dirección [60].



*Figura 4.10. Medida del trail. [60]*

Ambos parámetros, el trail y el offset se complementan para conseguir el mejor equilibrio entre estabilidad y maniobrabilidad. En el caso de las bicicletas de enduro y descenso, el offset ayuda a reducir el trail, mientras que en las de cross country el offset aumenta el trail; de tal manera que en ambos casos se logra el óptimo de maniobrabilidad y equilibrio.

### 4.1.3. Modelos de cuadros

Los modelos utilizados como referencia se muestran a continuación. Se han seleccionado estos cuadros porque las marcas proporcionan el peso de los mismos, además de sus medidas, mostradas en la Tabla 4.1. Aunque todas las marcas muestran las medidas de sus modelos, no todas muestran su peso; y las que sí lo hacen, no proporcionan el peso de sus modelos de competición si no de los modelos de calle de gama alta para no revelar sus fortalezas.

Tabla 4.1. Medidas y características de los modelos de referencia.

Modelo	BH Ultimate 29	Canyon Exceed	Orbea ALMA M-LTD	Scott scale 900 RC	Canyon Grand Canyon	Scott scale 945
Material	Fibra de carbono	Fibra de carbono	Fibra de carbono	Fibra de carbono	Aluminio	Aluminio
Ángulo tubo del sillín	73°	74°	73,5°	73,2°	73,5°	72,5°
Ángulo tubo frontal	68,5°	69,5°	69,5°	69,5°	68,5°	69,5°
Tubo sillín [mm]	440	440	445	440	440	440
Tubo frontal [mm]	100	100	95	100	100	105
Batalla [mm]	1108	1104	1092	1102	1112,4	1096
Caída pedalier [mm]	65	63	61	58	59,4	60
Vainas [mm]	430	427	430	425	427,5	438
Peso [g]	980	870	950	949	1620	1470

El valor del peso proporcionado es de una única talla y siempre suele ser la misma, talla M, que suele ser la que mejor relación medidas-peso tiene. Además, se elige esta talla por ser la menor de las tallas que comparte geometría con el resto, con lo que será la de menor peso; no se selecciona talla S porque ésta suele tener una geometría ligeramente distinta debido a la complejidad de introducir las ruedas grandes (de 29 pulgadas) en los modelos más pequeños, por los valores límite de reach y stack que se trataron en el anterior apartado.

## 4.2. Diseño de los modelos a ensayar

Para la elaboración de los diseños se utilizará el software Solid Edge versión ST9 de la empresa SIEMENS. Este software permite el diseño y desarrollo de productos en el ámbito computacional para su posterior fabricación o implementación.

A continuación, se comentarán los diseños realizados. Para la creación de los mismos se han utilizado superficies con la geometría adecuada para permitir un mejor mallado en el software de análisis y evitar un elevado volumen de nodos y elementos finitos, con el fin de minimizar el tiempo de cálculo.

En primer lugar, se tratarán los aspectos comunes a ambos cuadros, como son las medidas y el material en que serán modelados. Se ha seleccionado como material el aluminio debido a sus propiedades y su buena relación resistencia-peso, además la selección de este material permitirá la posterior comparación con otros modelos del mercado fabricados en aluminio. También se ha seleccionado la talla M de cuadro a fin de poder comparar los diseños con los de otras marcas en cuanto a peso y dimensiones. Las características de los modelos con los que comparar se encuentran en la Tabla 4.1.

Una vez seleccionada la talla se selecciona el comportamiento deseado de la bicicleta y la modalidad para la que van a ser diseñados los modelos. Los diseños irán enfocados a la modalidad de cross country o XC, competitivo; presentará líneas más agresivas con las que se busca no tanto la comodidad como el rendimiento sobre la bicicleta. Por tanto, se busca que el comportamiento de la bicicleta sea un comportamiento agresivo en el paso por curva y a la vez que se busca máximo rendimiento en la pedalada, debido a la complejidad de los circuitos de XC actuales, cada vez más técnicos.

Para conseguir un rápido paso por curva es necesario una bicicleta manejable, reactiva y con buena maniobrabilidad. Por ello se busca una bicicleta corta, cuya longitud entre ejes esté muy próxima a 1 metro de distancia. También se selecciona un ángulo de dirección más cerrado que permite acercar la horquilla al centro de gravedad, aspecto crucial para ascensos con demasiada inclinación.

Para conseguir el máximo rendimiento en la pedalada, se selecciona un ángulo del tubo del sillín próximo a los  $74^\circ$  con el fin de adelantar el centro de gravedad de la bicicleta y convertirla en una geometría más escaladora. De igual manera, se han seleccionado vainas más cortas para aumentar la manejabilidad y, sobre todo, la rigidez del conjunto.

Las medidas y pesos de los cuadros diseñados se muestran en la Tabla 4.2. En cuanto a las limitaciones de reach y stack, se comprueba que los valores no son inferiores a los establecidos en el sector, ya que presentan un reach de 431,64 milímetros, superior a los 390 milímetros recomendados; y un stack de 609,95 milímetros, superior a los 600 milímetros recomendados.

El valor del peso de cada modelo, indicado en la Tabla 4.2, corresponde con el valor que arroja el programa al aplicar el material. Puesto que se han utilizado superficies para diseñar, y en el análisis se aplica el espesor correspondiente a cada modelo para cumplir los requisitos; al introducir dicho valor de espesor, el software devuelve el dato del peso.

Tabla 4.2. Medidas y características de los modelos diseñados.

Modelo	Tubos de aluminio soldados	Aluminio monocasco
Material	Aluminio	Aluminio
Ángulo tubo del sillín	73,5°	73,5°
Ángulo tubo frontal	69,5°	69,5°
Tubo sillín [mm]	435	435
Tubo frontal [mm]	95	95
Batalla [mm]	1088	1088
Caída pedalier [mm]	62	62
Vainas [mm]	428	428
Peso [g]	2024,2	1323,9

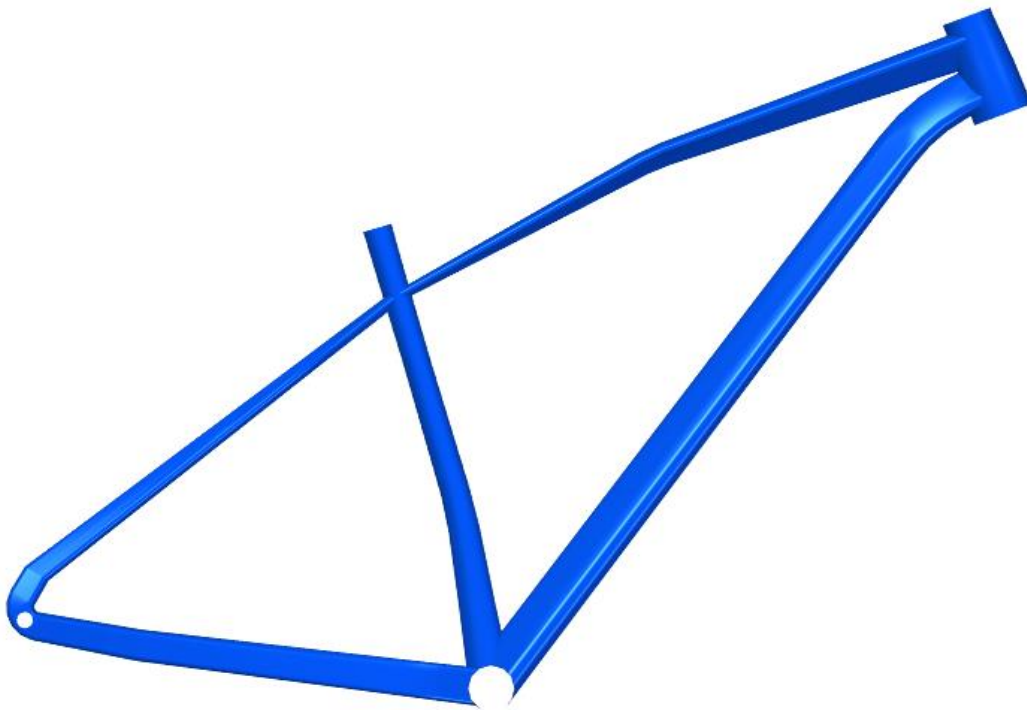
A continuación, se presentan las tecnologías para las que han sido diseñadas los cuadros:

- Ruedas de 29 pulgadas, y 3 pulgadas de balón. Asegurando un amplio paso de rueda y la inclusión de ruedas grandes cada vez más utilizadas en el sector. El amplio paso de rueda asegura una mejor evacuación de barro en caso de condiciones meteorológicas adversas, ya que en la modalidad para la que han sido diseñados, el XC o cross country, no se suelen utilizar ruedas de más de 2,5 pulgadas de balón.
- Eje trasero boost de 12 milímetros de diámetro y 148 mm de longitud, que asegura una elevada rigidez del conjunto cuadro-rueda trasera.
- Dirección tapered cónica de 44 milímetros en la parte superior del tubo de dirección y 56 milímetros en la parte inferior. Lo que asegura una mayor precisión en el paso por curva y un conjunto de dirección más rígido.
- La tija que incorporarán deberá presentar un diámetro de 27,2 milímetros.
- Las cajas de pedalier a instalar deberán ser BB30 de 73 mm de longitud en el modelo de tubos de aluminio soldado; y BB92 de 92 mm de longitud en el caso del modelo monocasco. En el caso del modelo monocasco la longitud del pedalier es mayor para aumentar la rigidez de esta parte del cuadro, que no se ve tan acusada en el modelo de tubos soldados ya que presenta un único tubo en el que se introduce el BB30, y no un conjunto de superficies unidas como el monocasco.

#### 4.2.1. Modelo fabricado con tubos de aluminio soldados

El primer modelo consiste en un cuadro formado por tubos de distintas geometrías y longitudes. Se pretende simular un cuadro de aluminio soldado como los cuadros convencionales que se llevan presentando en el sector prácticamente desde los inicios de la bicicleta.

Tras una gran cantidad de diseños, y con el objetivo de optimizar al máximo el modelo, y cumplir los ensayos de manera óptima; se ha alcanzado el diseño final mostrado en la Figura 4.11 y la Figura 4.12. La optimización del diseño ha consistido en la modificación de las trayectorias de los tubos y las secciones a lo largo de las mismas, así como, las líneas de intersección de los tubos, para lograr el mínimo espesor posible que cumpla con los requisitos de ensayo (en este caso 2,3 milímetros), y, por tanto, el mínimo peso del diseño (se alcanzan los 2,0242 kilogramos).



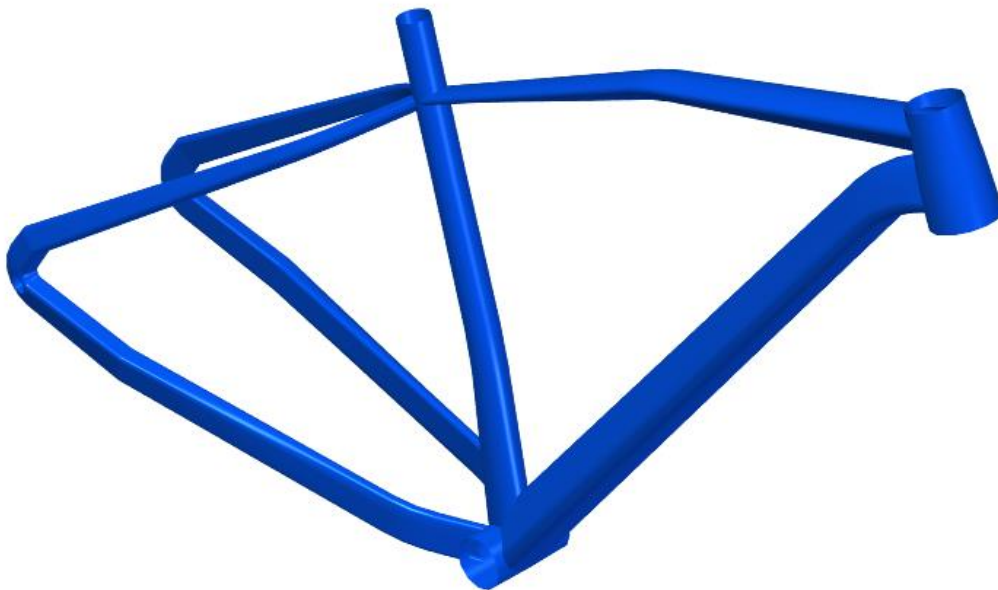
*Figura 4.11. Modelo con tubos de aluminio soldado. Vista de perfil.*

Cada tubo ha sido diseñado mediante la imposición de una trayectoria y varias secciones de diferente geometría a lo largo de la misma. Mediante la herramienta de creación de superficies por barrido, del programa Solid Edge ST9 y la herramienta de corte, se han ido modelizando los tubos.

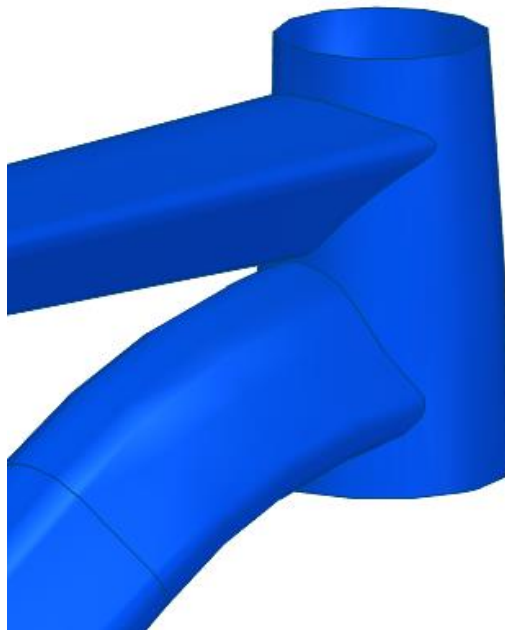
El diseño mediante trayectorias y secciones múltiples pretende simular la geometría de los tubos una vez finalizado el proceso de fabricación mediante hidroconformado.

Los tubos modelizados han sido el tubo de dirección, tubo superior, tubo inferior, caja de pedalier, tubo del sillín, tubo del tirante, tubo de la vaina y tubo de unión entre vaina y tirante. A continuación, en la Figura 4.13 se muestra el detalle de la unión de los tubos superior, inferior y de dirección; en la Figura 4.14 el conjunto de caja de pedalier; en la Figura 4.15, la unión del tubo del sillín, los tirantes y el superior; y en la Figura 4.16 el tubo de unión de los tirantes y las vainas. Para las vistas en detalle se han mostrado las aristas y líneas de corte de los tubos.





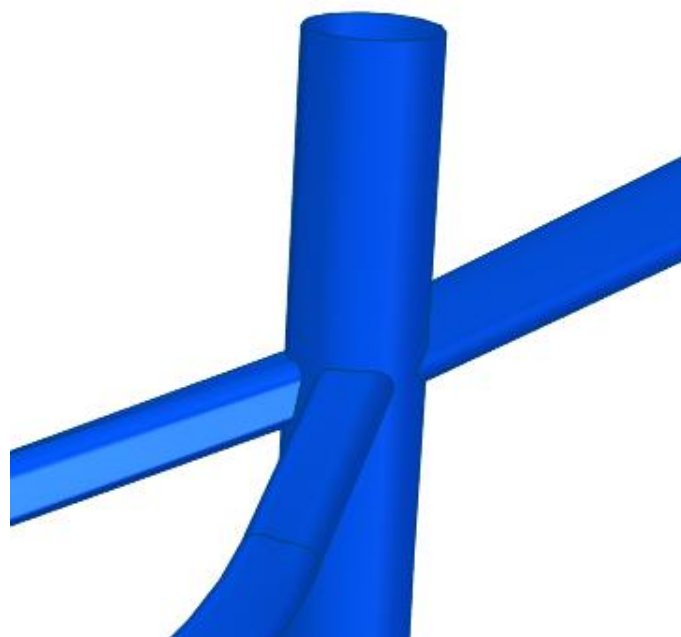
*Figura 4.12. Modelo con tubos de aluminio soldado. Vista isométrica.*



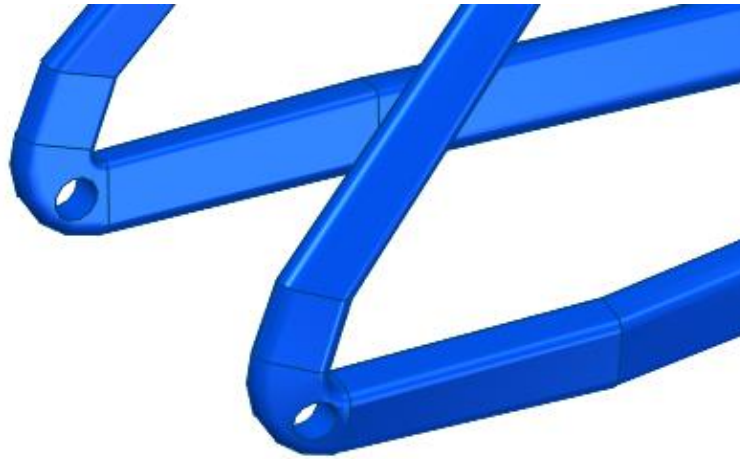
*Figura 4.13. Detalle de la unión tubo superior-inferior-de dirección. Modelo tubos.*



*Figura 4.14. Detalle del conjunto caja de pedalier. Modelo tubos.*



*Figura 4.15. Detalle de la unión tirantes-tubo superior-tubo de sillín. Modelo tubos.*

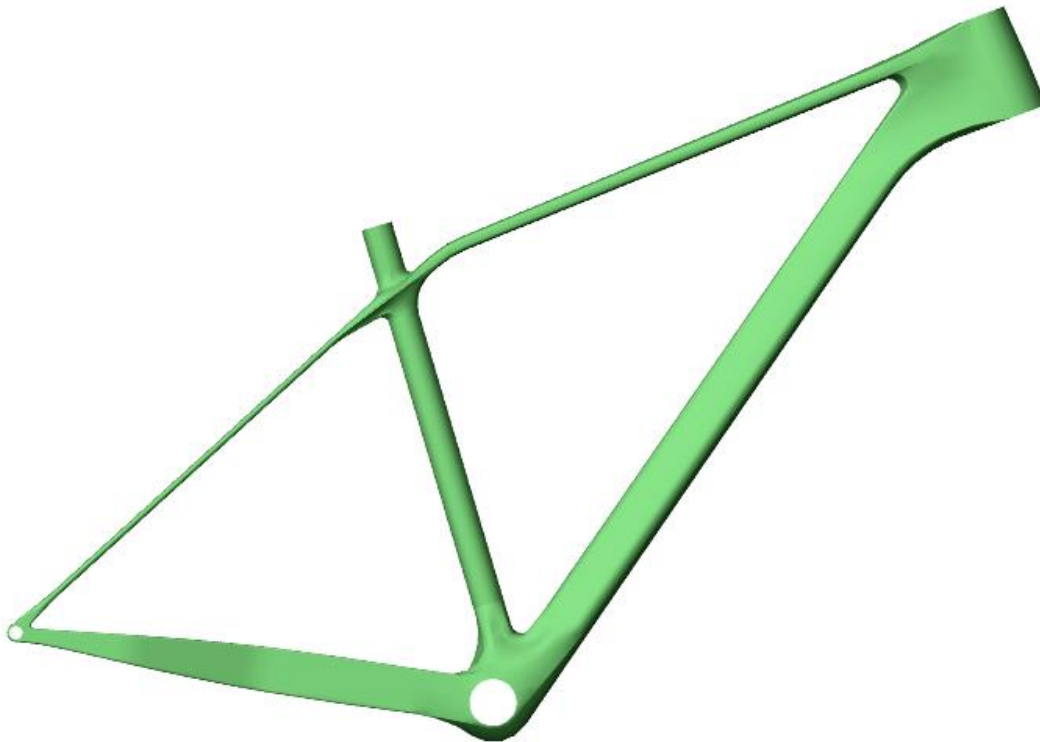


*Figura 4.16. Detalle tubo de unión de vainas y tirantes. Modelo tubos.*

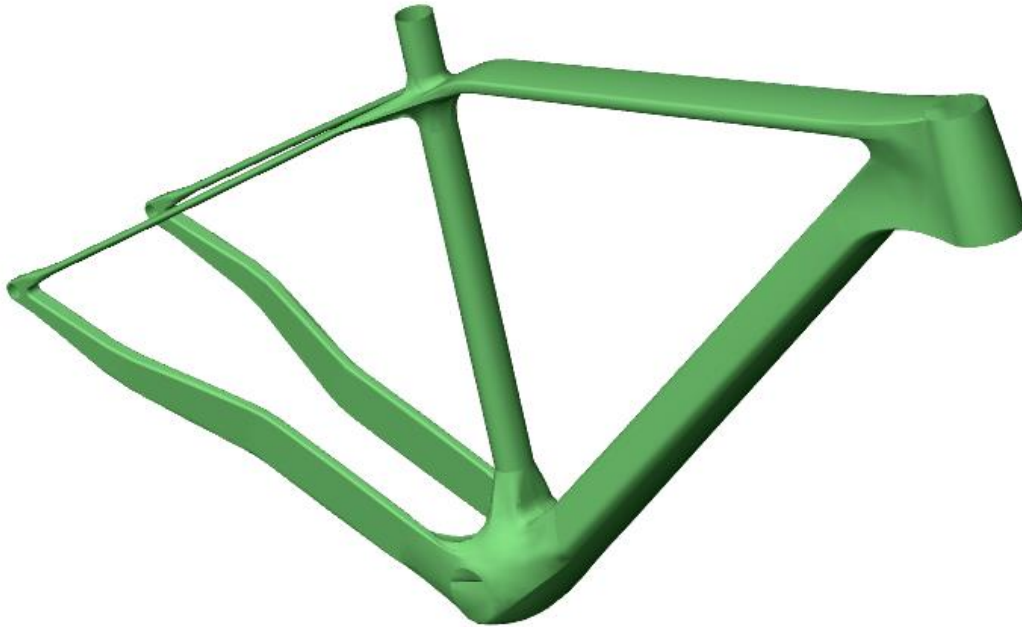
#### **4.2.2. Modelo fabricado en monocasco de aluminio.**

El segundo modelo consiste en una geometría monocasco cuya intención es simular un cuadro fabricado en una única pieza mediante técnicas de deposición aditiva de material. En este caso, debido a que no es necesario soldar los tubos, ya que se fabrica en una única etapa, se presentan formas más suaves en el modelo que conllevan a evitar puntos de concentración de tensiones.

De igual manera que en el modelo de tubos, el objetivo es lograr el mínimo espesor posible (en este caso 1,45 milímetros), para obtener el mínimo peso posible (se alcanza un valor de 1,3239 kilogramos).

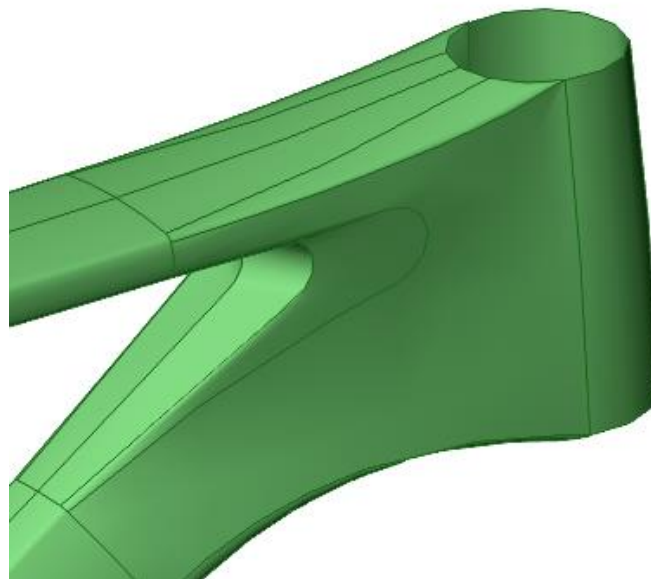


*Figura 4.17. Modelo en aluminio monocasco. Vista de perfil.*



*Figura 4.18. Modelo en aluminio monocasco. Vista isométrica.*

Este diseño se ha realizado en dos fases. La primera ha sido el dimensionamiento de los tubos, que se ha realizado de igual forma que en el modelo de tubos de aluminio soldado, con superficies definidas por secciones y trayectorias. Y en la segunda fase se han generado las uniones de dichos tubos (la unión vaina-tirante, tubo de sillín-tubo superior-tirantes, tubo inferior-vainas-tubo de sillín, y el conjunto de dirección) mediante superficies limitadas por líneas de puntos significativos y trayectorias específicamente definidas, alcanzando un total de más de 100 superficies definidas en todo el cuadro.

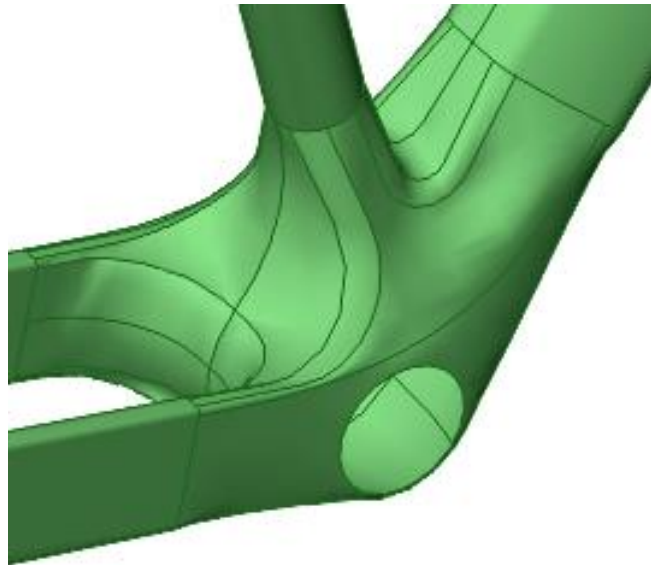


*Figura 4.19. Detalle conjunto de dirección. Modelo monocasco.*

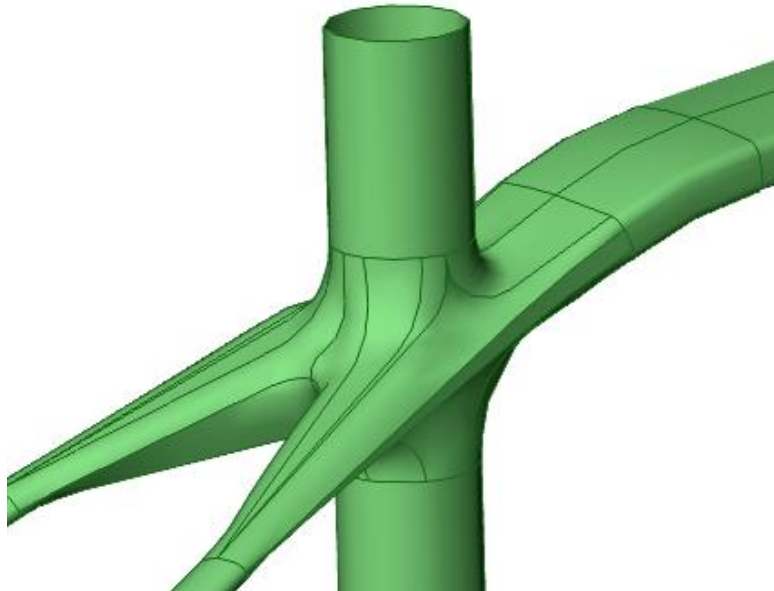
La optimización de este modelo ha consistido en la modificación de las trayectorias y líneas de puntos significativos con el fin de lograr, de igual manera que en el modelo de

tubos de aluminio soldados, el mínimo espesor que garantice el cumplimiento de los requisitos, y, por tanto, el menor peso posible.

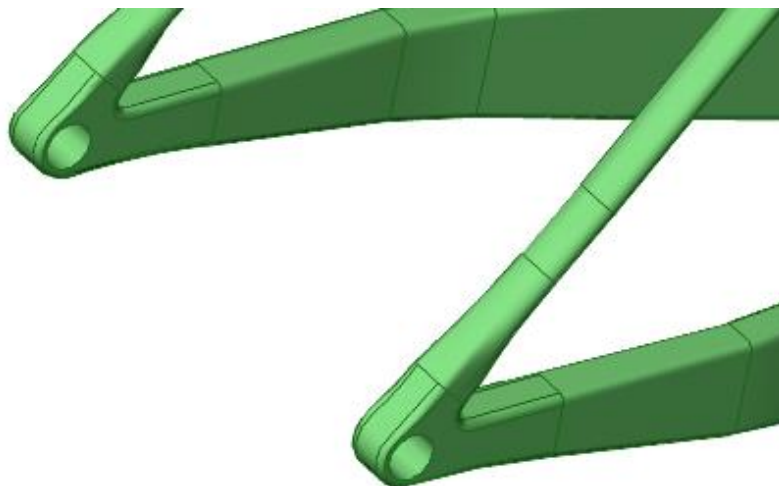
Para conocer el diseño de mejor manera, se muestran los detalles de las uniones, con las trayectorias y líneas de puntos significativos marcadas. En la Figura 4.19 se muestra el detalle del conjunto de dirección; en la Figura 4.20 el conjunto de caja de pedalier; en la Figura 4.21, la unión del tubo del sillín, los tirantes y el superior; y en la Figura 4.22, la unión de tirantes y vainas.



*Figura 4.20. Detalle caja de pedalier. Modelo monocasco.*



*Figura 4.21. Detalle de la unión tirantes-superior-tubo de sillín. Modelo monocasco.*



*Figura 4.22. Detalle unión vaina-tirante. Modelo monocasco.*

## 5. ANÁLISIS

---

### 5.1. Ensayos propuestos por la normativa

A continuación, se expondrán los principales métodos y dispositivos de ensayo a fatiga dictaminados por la normativa correspondiente, aplicables al proyecto. Se suprimirán las indicaciones y ensayos de la norma que no presenten relación con el proyecto, tales como indicaciones y métodos de ensayo para cuadros de doble suspensión. Además, se implementarán los ensayos en el software ANSYS.

El software computacional ANSYS es el idóneo para este tipo de ensayos ya que aplica el método de cálculo por elementos finitos. Este método consiste en la discretización de una geometría compleja en elementos, acotados por nodos, permitiendo obtener la solución numérica del modelo.

El método de los elementos finitos o MEF, ha sido ideado para implementar en programas de cálculo, como ANSYS y con él se obtienen aproximaciones de la solución de ecuaciones diferenciales parciales muy complejas que de forma analítica no se podrían obtener. El entramado de nodos y elementos que utiliza el MEF se denomina malla. Esta malla se aproxima más al modelo cuantos más nodos y elementos tenga, y, por tanto, se obtendrá una solución más aproximada que con menos elementos; también se debe conocer que cuanto más fino es el mallado, mayor es el tiempo de cálculo del problema.

Los ensayos a resolver en el proyecto son simulaciones a fatiga de los distintos cuadros diseñados. La fatiga es la aplicación cíclica de cargas sobre el material, con la que se pretende conocer el fallo del mismo a la aplicación de dichas cargas, que en muchos casos son menores que en la aplicación de cargas estáticas. En los ensayos a fatiga aparecen tres factores cruciales que se deben controlar para asegurar el comportamiento del material en este tipo de ensayos: el criterio de fallo a fatiga, la curva de vida del material, y los ciclos de aplicación de la carga [61].

En primer lugar, se tienen diversos criterios de fallo, representados en la Figura 5.1, criterio de Gerber, criterio de Goodman y criterio de Soderberg. Estos criterios establecen el fenómeno que debe suceder para que se produzca el fallo del material.

En el caso del proyecto se utilizará la teoría de Goodman, que es la más utilizada, a pesar de que la de Gerber es la más exacta y Soderberg la más restrictiva. Además, se ha seleccionado este criterio porque es con el que se obtienen ciclos más desfavorables para la obtención del factor de seguridad a fatiga (factor que determina si la estructura fallará ante la presencia de cargas cíclicas). Dicho parámetro será utilizado en el desarrollo del proyecto, y con Goodman se obtienen los valores más desfavorables de dicho factor, por lo que se actuaría del lado de la seguridad obteniendo modelos ligeramente sobredimensionados.

Según el criterio de Goodman, la variación de la tensión alternante con la tensión media se describe con una recta como la mostrada en la Figura 5.1. Dicha recta corta al eje de ordenadas en el valor de tensión de resistencia a fatiga; y en el eje de abscisas al valor de tensión de resistencia a rotura. Además, en la Figura 5.2 se observa la curva de Goodman corregida que utiliza el software ANSYS.

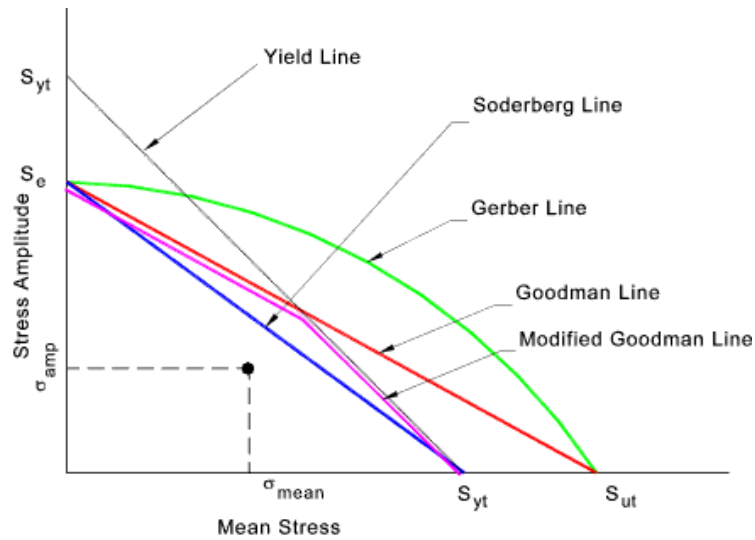


Figura 5.1. Diagrama de criterios de fatiga. [61]

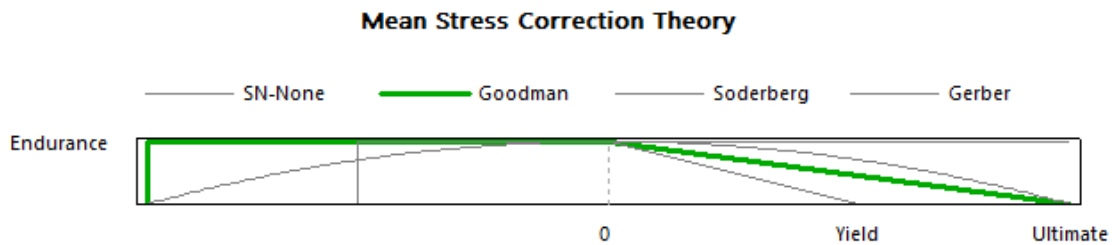


Figura 5.2. Diagrama de Goodman en ANSYS.

En segundo lugar, en cuanto a las curvas de vida del material, son curvas que determinan el número de ciclos y la tensión para dicho número de ciclos. En la Figura 5.3 se muestran diversas curvas de diferentes tipos de aluminio, de tal forma que para cada tensión se tienen los ciclos de vida del material [62].

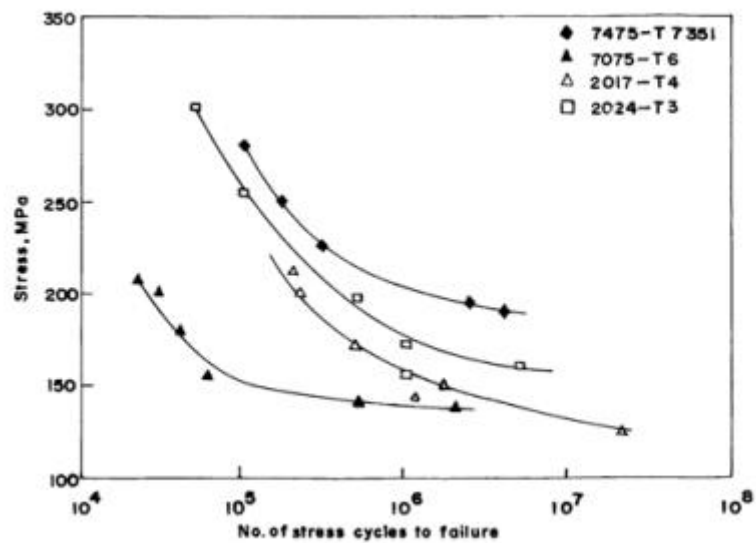


Figura 5.3. Curvas S-N de distintos aluminios. [62]



Por último, para determinar el comportamiento a fatiga, se tiene el número de ciclos de aplicación de la carga. Este número de ciclos vendrá determinado por el tipo de ensayo a realizar.

Debido a las características de los ensayos y las comprobaciones realizadas en referencia a la Figura 5.5 y la Figura 5.6, se utilizará la versión académica ANSYS 17.2. Ya que esta versión arroja un resultado correcto sin necesidad de emplear una versión comercial que supere el número de nodos permitidos en la académica, aumentando el tiempo de análisis de manera innecesaria.

Puesto que el material de ensayo es el mismo para ambos modelos, aluminio, se muestra en la Tabla 5.1 sus características y propiedades mecánicas.

Tabla 5.1. Propiedades del aluminio.

Material	Aluminio
Densidad, $\rho$	2770 [Kg/m <sup>3</sup> ]
Módulo de Young, E	71 [GPa]
Coeficiente de Poisson	0,33
Límite elástico a tracción, $\sigma_y$	280 [MPa]
Límite elástico a compresión, $\sigma_y$	280 [MPa]
Límite de rotura, $\sigma_{rot}$	310 [MPa]

Para asegurar la validez de cada uno de los ensayos, la parte 2 de la norma establece los siguientes requisitos de seguridad para bicicletas:

- Al ensayar según el método descrito correspondiente, no debe haber roturas ni fisuras visibles en la geometría ensayada.
- El cuadro debe superar el número de ciclos de vida propuestos en el ensayo.

Con el fin de asegurar dichos requisitos, para este proyecto, se establecen las siguientes medidas:

- Se considerará que para que no exista rotura ni fisura en el cuadro ensayado, no se superará el límite elástico del material utilizado. Para tomar una medida de seguridad aún más restrictiva, se va a considerar un factor de seguridad ( $n$ ) en la tensión de Von Misses, de valor 1,3 del límite elástico. Por tanto, el nuevo valor de tensión admisible es 215,38 MPa; obtenido de la ecuación 5.2, derivada de la definición de factor de seguridad (mostrada en la ecuación 5.1). Donde  $\sigma_y$  es el valor del límite elástico del material;  $\sigma_{adm}$ , el valor de la tensión admisible en el ensayo; y,  $n$  el valor del factor de seguridad.

$$n = \frac{\sigma_y}{\sigma_{adm}} \quad [5.1]$$

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_y}{n} = \frac{280}{1.3} = 215.38 \text{ MPa} \quad [5.2]$$

- Se comprobará que la vida del cuadro ensayado supere los ciclos indicados por la normativa para el ensayo correspondiente.
- De manera adicional se establecerá que el coeficiente de seguridad a fatiga que arroja el software sea superior a 1.

### 5.1.1. Ensayo de fatiga por fuerzas horizontales

En este ensayo para cuadros recomendado por la norma ISO 4210, se utilizará una falsa horquilla de mayor rigidez y resistencia que la que se montará finalmente en la bicicleta. Las medidas y características de dicha horquilla se presentan en el anexo A de la misma norma ISO 4210 [48].

El primer método de ensayo a fatiga, es un ensayo en el que se instala el conjunto cuadro-horquilla fijándolo en la unión de los tirantes y las vainas, en el eje trasero, permitiendo la rotación del conjunto sobre el mismo. Se verifica la alineación de ambos ejes en posición horizontal, para el correcto posicionamiento del cuadro en el banco de ensayos. El conjunto en posición de ensayo se muestra en la Figura 5.4.

En el ensayo se aplicarán ciclos de fuerzas dinámicas horizontales hacia delante,  $F_2$ , y hacia atrás,  $F_3$ , sobre el eje delantero, en la falsa horquilla, durante  $C_1$  ciclos; cuyos valores se muestran en la Tabla 5.2. En el banco de ensayo se permite el movimiento longitudinal del eje delantero, pero no el vertical.

Tabla 5.2. Ensayo de fatiga por fuerzas horizontales. Fuerzas y ciclos.

Tipo de bicicleta	Bicicletas de paseo	Bicicletas para adultos jóvenes	Bicicletas de montaña	Bicicletas de carreras
$F_2$ [N]	450	450	1200	600
$F_3$ [N]	450	450	600	600
$C_1$ [ciclos]	100000	100000	50000	100000

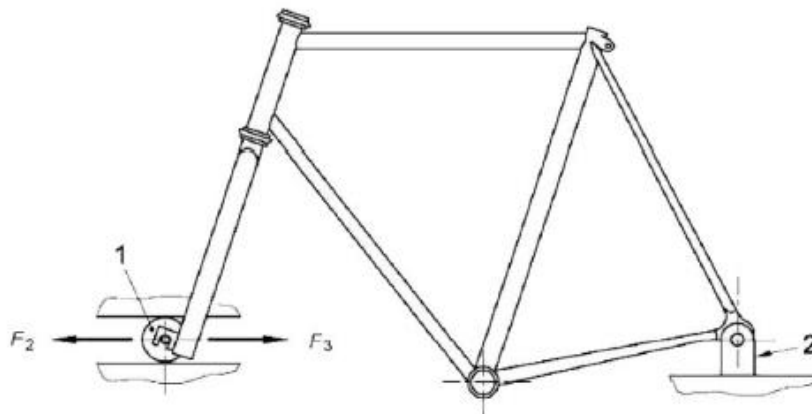


Figura 5.4. Ensayo de fatiga por fuerzas horizontales. Conjunto cuadro-horquilla.

Donde:

- $F_2$  es la fuerza hacia delante
- $F_3$ , fuerza hacia atrás
- $C_1$ , numero de ciclos
- 1, rodillo guiado que puede girar libremente
- 2, montura pivotante rígida para el punto de fijación del eje trasero

Una vez expuesto el ensayo que propone la normativa se procede a su modelización en el software ANSYS. Para ello, se modelizan las cargas, apoyos y condiciones de contorno.

- **Cargas**

Este primer ensayo se estudiará de dos formas distintas. En la primera, se introduce el componente de falsa horquilla en el cuadro y se aplica la carga en el extremo de dicha horquilla. En la segunda, con el fin de simplificar el tiempo de cálculo, reduciendo el número de nodos y elementos del modelo, se realiza el ensayo con una fuerza remota aplicada sobre el tubo de dirección.

Tras los resultados obtenidos se puede comprobar que las zonas afectadas coinciden y el valor crítico de tensión se alcanza en la misma zona, además de presentar el mismo valor para ambos supuestos de carga. En la Figura 5.5 se muestra el primer caso de carga, ensayo con falsa horquilla; y en la Figura 5.6 se muestra el segundo caso, ensayo con fuerza remota. Debido a la similitud de los resultados y con el objetivo de obtener un mejor mallado del cuadro, y una simplificación en el ensayo, empleando un menor tiempo de análisis; a partir de este momento se utilizarán fuerzas remotas en sustitución de los componentes mecánicos de ensayo.

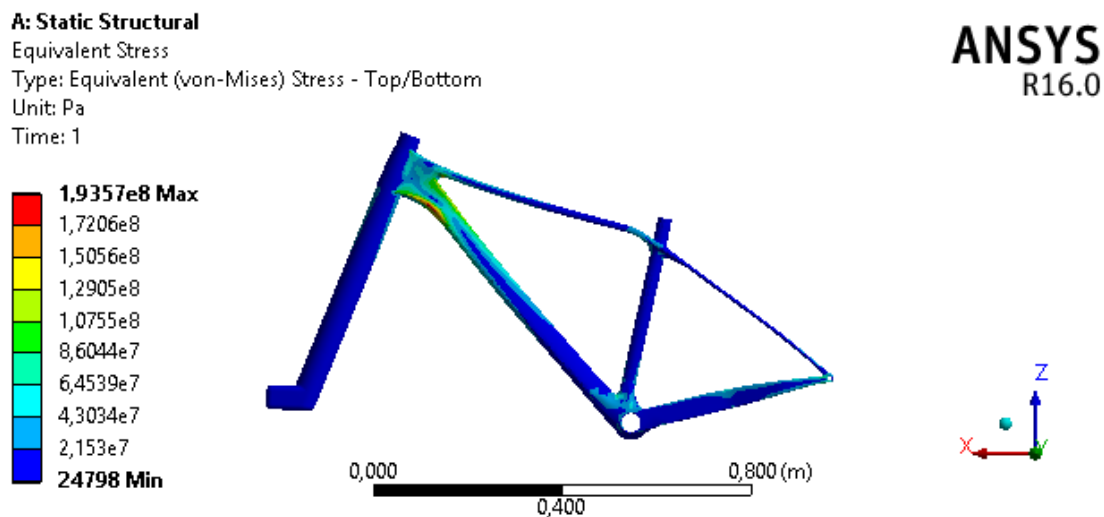


Figura 5.5. Ensayo de fatiga con fuerzas horizontales, aplicando falsa horquilla.

**C: Ensayo de fatiga con fuerzas horizontales**

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: Pa

Time: 1

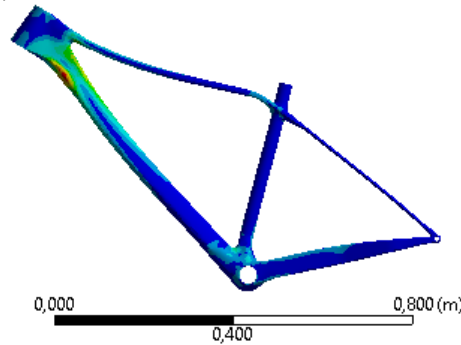
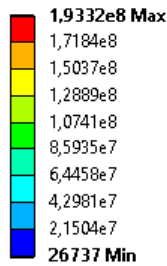


Figura 5.6. Ensayo de fatiga con fuerzas horizontales, aplicando fuerza remota.

Por tanto, en cuanto a cargas, se aplica una fuerza remota horizontal de valor  $F_2$  sobre el tubo de dirección a una distancia correspondiente a la longitud entre ejes o batalla de la bicicleta, esto son 1088 milímetros desde el origen que es el eje trasero. Para conseguir una variación de la fuerza para el análisis a fatiga, en el módulo de fatiga se aplica a dicha fuerza una ratio de valores desde 1 hasta -0,5. De esta forma se consigue alcanzar la fuerza  $F_2$  cuando el valor es 1, y  $F_3$  cuando el valor es -0,5. Cada ciclo comprende la carga hasta  $F_2$  (1200 Newton), la descarga, la carga hasta  $F_3$  (-600 Newton), y la descarga de ésta última.

- **Apoyos y condiciones de contorno**

El apoyo del eje trasero se ha modelizado mediante un desplazamiento remoto (remote displacement), seleccionando la superficie de contacto del cuadro con el eje, en la unión de los tirantes con las vainas. En las propiedades del desplazamiento remoto se restringen los desplazamientos en los tres ejes X, Y, Z, (mostrados en la Figura 5.7) y los giros en X y Z, permitiendo el giro del cuadro sobre el eje Y, tal y como indica la norma.

En la Figura 5.7 se muestra el esquema de cargas y condiciones de contorno aplicadas al cuadro en este ensayo de fatiga con fuerzas de pedaleo realizado con ANSYS.

**D: Ensayo de fatiga con fuerzas horizontales**

Static Structural

Time: 1, s

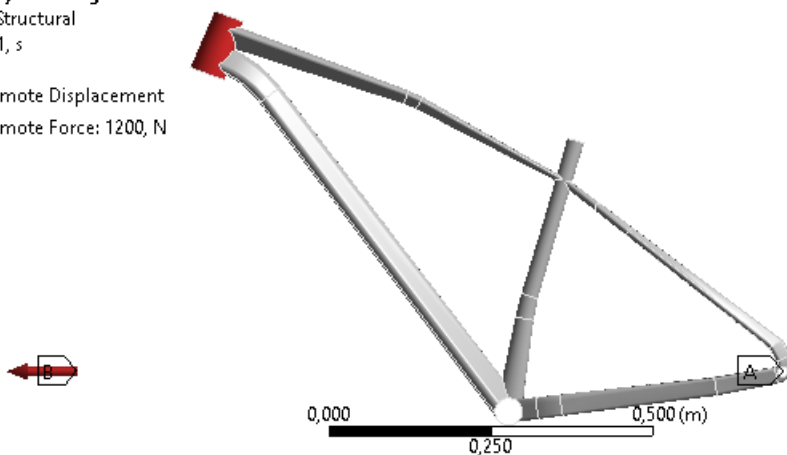
**A** Remote Displacement**B** Remote Force: 1200, N

Figura 5.7. Ensayo de fatiga con fuerzas horizontales. ANSYS.

### 5.1.2. Ensayo de fatiga con una fuerza vertical

Para la realización de este ensayo de acuerdo a la norma ISO 4210, se instala el cuadro en su posición habitual de uso, fijándolo en el eje trasero, permitiendo así la rotación del mismo. Se instala una falsa horquilla y se apoya su extremo sobre la base de forma que se permite libertad de movimiento a lo largo del eje longitudinal [48].

A continuación, se introduce una tija a la profundidad mínima de introducción, en la parte superior del tubo del sillín a una profundidad de 75 mm, y se fija rigidamente a éste. A dicha tija se fija una extensión horizontal hacia atrás en la parte superior de la misma, a una distancia  $h_3$  de 250 mm correspondiente a la altura máxima que alcanzaría el sillín. En el extremo de la extensión se aplican ciclos de fuerza verticales de valor  $F_4$ , a una distancia de 70 mm de la unión de la tija y la extensión, tal y como se muestra en la Figura 5.8. se realizarán 50000 ciclos y el valor de la fuerza se especifica en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Ensayo de fatiga con una fuerza vertical. Fuerza sobre la tija del sillín.

Tipo de bicicleta	Bicicletas de paseo	Bicicletas para adultos jóvenes	Bicicletas de montaña	Bicicletas de carreras
$F_4$ [N]	1000	500	1200	1200

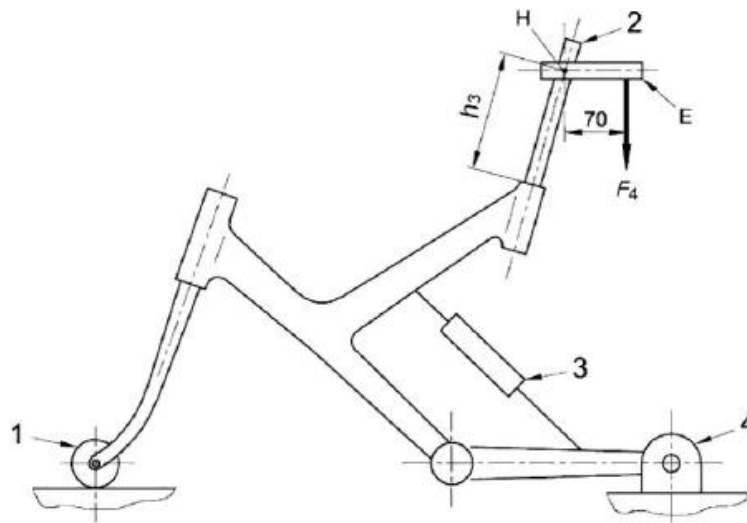


Figura 5.8. Ensayo de fatiga con una fuerza vertical. Conjunto de ensayo.

Donde:

- $F_4$  es la fuerza vertical a aplicar
- $h_3$ , altura a la que se fija la extensión horizontal, 250 mm
- E, extensión horizontal rígida hacia atrás
- H, posición equivalente al centro de fijación del sillín con la bicicleta
- 1, rodillo que puede girar libremente
- 2, barra de acero
- 3, unidad de suspensión bloqueada o una unión rígida para vainas pivotantes
- 4, montura pivotante rígida para el punto de fijación del eje trasero

A continuación, una vez introducido el método de ensayo, se procede a la modelización en el software con las siguientes condiciones de cargas y apoyos.

- **Cargas**

En el caso de estudio del ensayo se situará una fuerza remota de valor  $F_4$ , indicado en la Tabla 5.3, correspondiente a bicicletas de montaña; en el tubo del sillín. Puesto que la norma indica que los ciclos de carga correspondientes al ensayo han de ser ciclos de carga y descarga, en el módulo de fatiga le daremos a la fuerza  $F_4$  condiciones zero based, es decir, que cada ciclo contemplará la carga y descarga. Se realizarán 50000 ciclos en estas condiciones.

- **Apoyos y condiciones de contorno**

En este ensayo se tienen dos condiciones de contorno, una en el tubo de dirección, por la posición de la horquilla y otra en el eje trasero, por el dispositivo de fijación del cuadro al banco de ensayos.

La primera condición de contorno, en el tubo de dirección, se ha modelizado con un desplazamiento remoto, en sustitución de la horquilla. Con este remote displacement se relaciona la superficie del tubo de dirección con el eje de la rueda delantera de tal forma que se aplican las siguientes características en el punto correspondiente al eje delantero de la bicicleta (punto B, de la Figura 5.9): se restringe el desplazamiento en direcciones Y y Z, además de los giros en ejes X y Z; y se permite el desplazamiento libre del punto en el eje X, así como el giro libre sobre el eje Y.

La segunda condición de contorno, el eje trasero se modeliza de la misma manera que en el ensayo de fatiga con fuerzas horizontales. Se aplica un desplazamiento remoto en el que se fija el desplazamiento en los tres ejes X, Y, Z y el giro en X y Z, dejando libre el giro en Y que permite al cuadro rotar sobre el eje trasero.

En la Figura 5.9 se observa el esquema del ensayo a fatiga mediante fuerzas verticales; tanto cargas como apoyos modelizados en ANSYS.

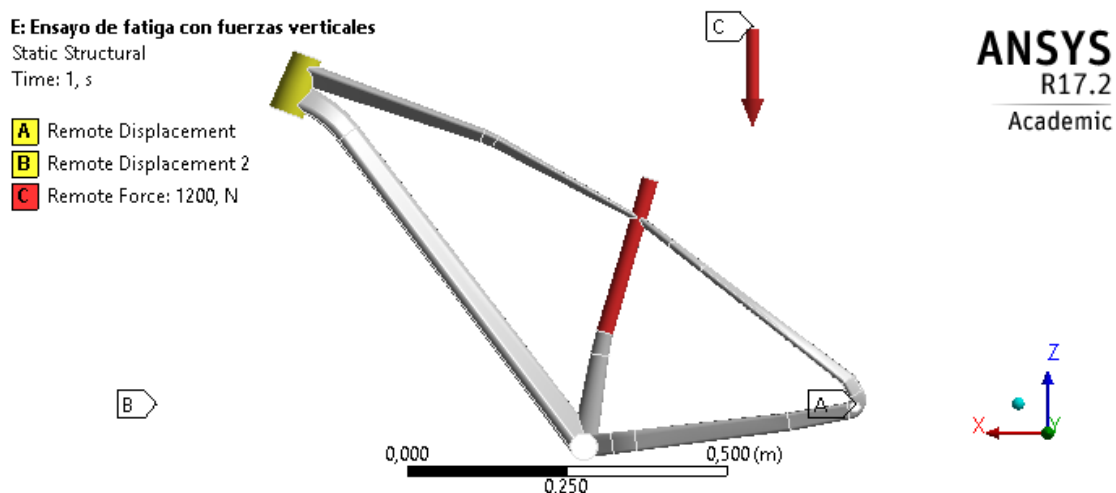


Figura 5.9. Ensayo de fatiga con fuerzas verticales. ANSYS.

### 5.1.3. Ensayo de fatiga con fuerzas de pedaleo

Todos los tipos de cuadros deben someterse a este ensayo según informa la norma ISO 4210. Además, se recomienda para este ensayo la utilización de una falsa horquilla más rígida y resistente que la horquilla que montará finalmente el cuadro [48].

Se monta el conjunto cuadro-horquilla sobre una base como la mostrada en la Figura 5.10, con la horquilla fijada mediante un sistema de sujeción al eje delantero a una distancia  $R_w$  de la mesa (igual al radio del conjunto rueda-neumático  $\pm 30\text{mm}$ ) y el buje libre permitiendo la rotación sobre su eje. El eje trasero se fija a una unión vertical rígida que tiene la misma altura que el dispositivo de fijación delantero, estando libre la parte superior para oscilar alrededor del centro del eje, pero garantizando una rigidez en el plano lateral y dotando al extremo de unión a la base de una unión tipo rótula como la de la Figura 5.10.

La norma permite la utilización de bielas, plato y cadena; o un conjunto de sustitución rígido para la realización del ensayo. En función de la opción seleccionada presenta unas indicaciones distintas, puesto que el objeto de ensayo es únicamente el cuadro, se optará por utilizar un conjunto de sustitución rígido como el mostrado en la Figura 5.10, en lugar de una transmisión de bielas, plato y cadena, convencional.

Se controlará que el conjunto utilizado permite la rotación libre respecto de la caja de pedalier y que los componentes que sustituyen a las bielas tengan una longitud de 175 mm, están dirigidos hacia delante y presentan una inclinación de  $45^\circ (\pm 2^\circ)$  respecto de la horizontal. Se bloquean dichos componentes en esta posición con la ayuda de un brazo de palanca vertical y un tirante con rótulas en los extremos que se conecta de manera perpendicular al eje de la rueda. La longitud del brazo vertical debe ser de 75 mm y el eje del tirante será paralelo y estará a 50 mm del plano transversal vertical del cuadro. Como se observa en la Figura 5.10.

En el ensayo se someterá cada eje del pedal a una fuerza repetida  $F_1$ , situada en un punto a 150 mm del eje del cuadro, y con una inclinación de  $7,5^\circ (\pm 0,5^\circ)$  respecto del plano longitudinal. Durante el ensayo se comprueba que la fuerza sobre un eje de pedal ha descendido hasta 5% o menos de la fuerza máxima antes de comenzar a aplicar la fuerza sobre el otro eje de pedal. Se realiza el ensayo durante 100000 ciclos, considerando un ciclo como la aplicación y retirada de las dos fuerzas de ensayo. el valor de la fuerza a aplicar se muestra en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Ensayo de fatiga con fuerzas de pedaleo. Fuerzas en eje del pedal.

Tipo de bicicleta	Bicicletas de paseo	Bicicletas para adultos jóvenes	Bicicletas de montaña	Bicicletas de carreras
$F_1$ [N]	1000	1000	1200	1100

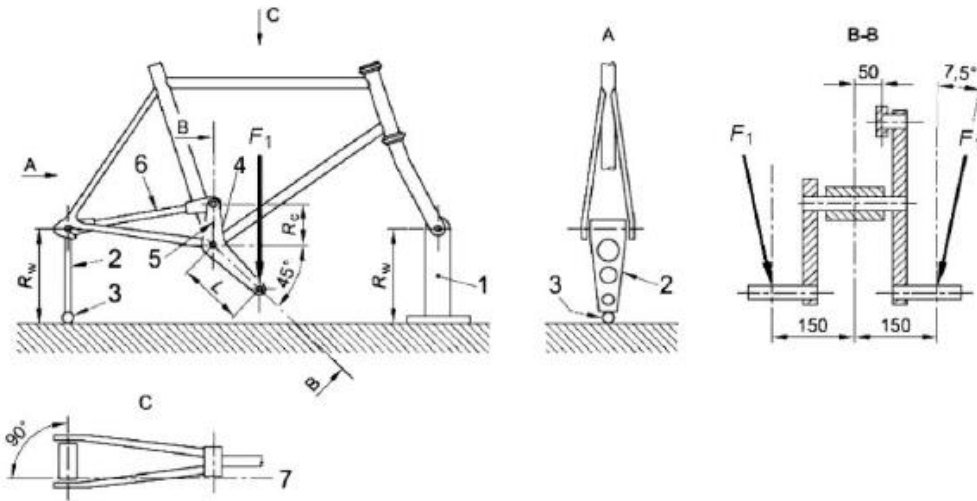


Figura 5.10. Ensayo de fatiga con fuerzas de pedaleo.

Donde:

- $R_w$  es la altura del dispositivo de fijación rígida y unión vertical
- $R_{CL}$ , longitud del brazo vertical, 75 mm
- $L$ , longitud de la biela, 175 mm
- 1, montaje rígido
- 2, unión vertical
- 3, rótula
- 4, montaje adaptador
- 5, brazo vertical
- 6, tirante
- 7, eje tirante

Una vez tratado el ensayo de fatiga propuesto por la norma se procede a la modelización en el software, de las cargas, apoyos y condiciones de contorno.

#### • **Cargas**

Este ensayo requiere de la introducción de varios pasos en el proceso de carga, de tal forma que en cada paso se aplique una de las cargas y sea una aplicación sucesiva (hasta que no descarga la primera no carga la segunda) y no simultánea. Dicho esto, las dos cargas a aplicar son fuerzas de valor  $F_1$  aplicadas como fuerzas remotas sobre el eje de pedalier y que actúan a la distancia de aplicación que indica el dispositivo específico. En el caso del ensayo, los puntos de aplicación, desde el eje de la rueda trasera, se sitúan a 547,5 milímetros en dirección X, 186 milímetros en dirección Z y 150 o -150 milímetros en dirección Y. Las fuerzas presentan una inclinación de  $7,5^\circ$  respecto de la vertical del cuadro. Por último, en el módulo de fatiga se establece una relación zero based que hace que cada ciclo contemple el proceso de carga y descarga del ensayo conjunto, el cual incluye los pasos en los que se alternan las fuerzas.

#### • **Apoyos y condiciones de contorno**

Para este ensayo aparecen dos condiciones de contorno, una aplicada sobre el tubo de dirección, y otra en referencia al eje trasero.



La primera condición corresponde al apoyo de la horquilla en el dispositivo de fijación delantero. Se modeliza como un desplazamiento remoto aplicado sobre la superficie del tubo de dirección y relacionado con el eje delantero (punto B, en la Figura 5.11). Este punto se sitúa a 1088 milímetros respecto del eje trasero (correspondiente a la batalla de la bicicleta), y se fijan los desplazamientos en los tres ejes X, Y, Z, y los giros respecto de X y Z; permitiendo la rotación respecto del eje Y.

La segunda condición corresponde con el dispositivo de fijación del eje trasero a la mesa de ensayo. Este dispositivo se modeliza con un desplazamiento remoto que relaciona el eje trasero (las superficies en contacto con el eje trasero que se encuentran en la unión de las vainas con los tirantes) y la rótula del dispositivo de fijación. El punto de la rótula (punto A, en la Figura 5.11), y, por tanto, origen del desplazamiento remoto se sitúa a 400 milímetros en dirección -Y, correspondiente al radio del conjunto rueda neumático. Se restringe el desplazamiento en los tres ejes X, Y, Z de dicho punto y se permiten los giros en los tres ejes X, Y, Z, por su condición de rótula.

En la Figura 5.11 se muestran las cargas, apoyos y condiciones de contorno del ensayo de fatiga con fuerzas de pedaleo.

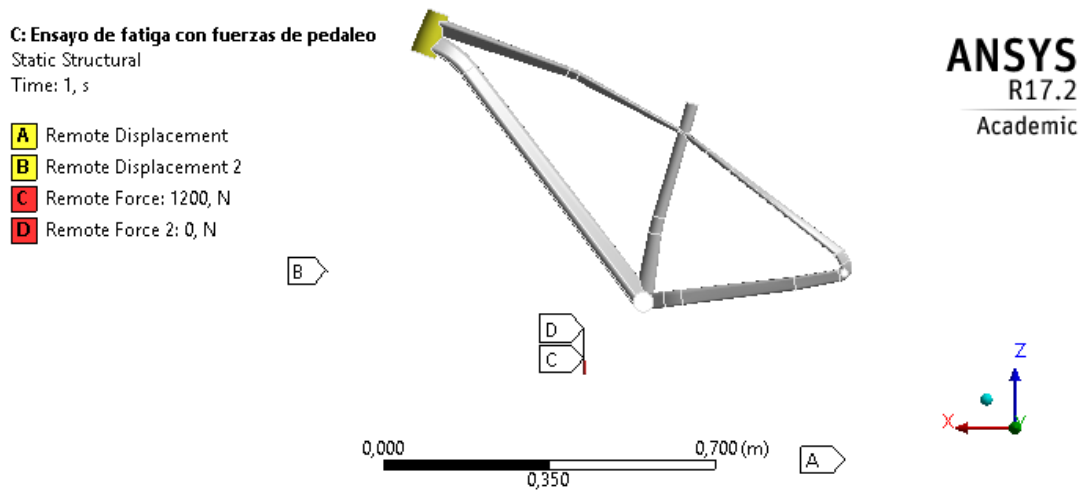


Figura 5.11. Ensayo de fatiga con fuerzas de pedaleo. ANSYS.

## 5.2. Resultados de los ensayos mediante elementos finitos

A continuación, se mostrarán los resultados de los análisis, así como el cumplimiento de los requisitos de seguridad.

### 5.2.1. Modelo fabricado con tubos de aluminio soldados

#### 5.2.1.1. Resultados del ensayo de fatiga con fuerzas horizontales

En cuanto al ensayo de fatiga con fuerzas horizontales se tiene, en la Figura 5.12, los resultados de la tensión equivalente de Von Mises; en la Figura 5.13, los resultados de la vida del cuadro para dicho ensayo; y, en la Figura 5.14, el factor de seguridad a fatiga. Además, en dichas figuras se muestra la localización de los valores máximos y mínimos de la medida ensayada. De igual manera, en la Tabla 5.5, se comprueba el cumplimiento de los requisitos.

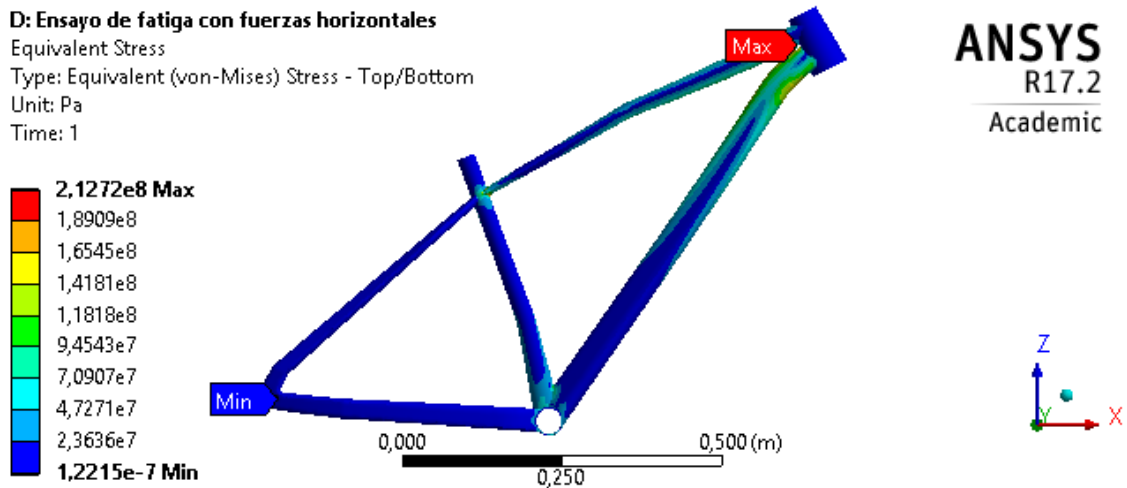


Figura 5.12. Tensión equivalente de Von Mises. Ensayo con fuerzas horizontales.

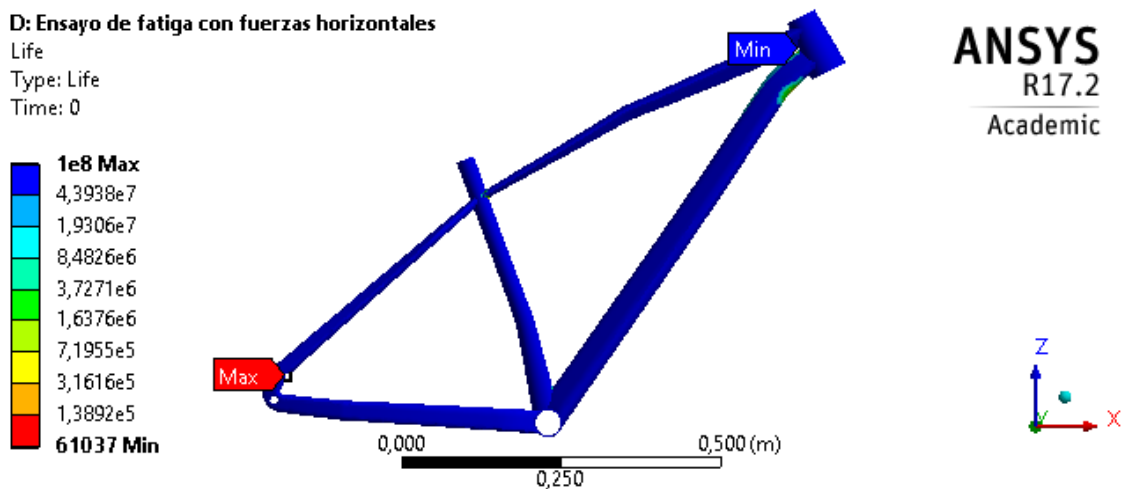
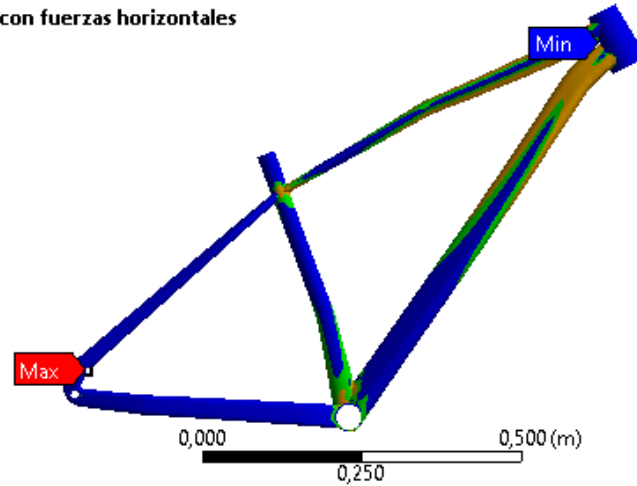
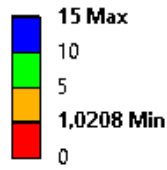


Figura 5.13. Ciclos de vida. Ensayo con fuerzas horizontales.

**D: Ensayo de fatiga con fuerzas horizontales**

Safety Factor  
Type: Safety Factor  
Time: 0



**ANSYS**  
R17.2  
Academic

Figura 5.14. Factor de seguridad a fatiga. Ensayo con fuerzas horizontales.

Tabla 5.5. Verificación de requisitos. Ensayo con fuerzas horizontales.

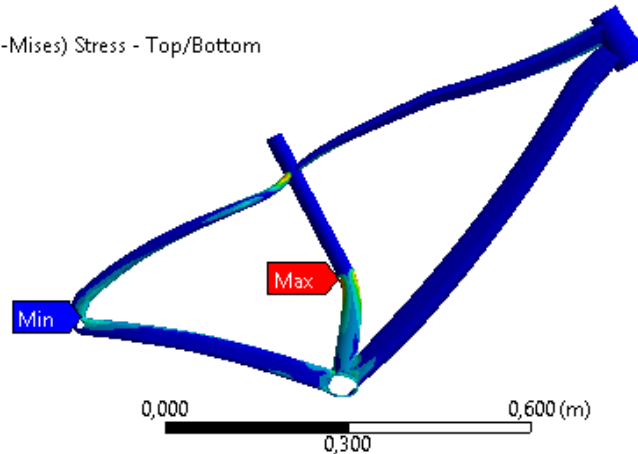
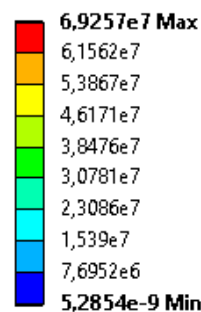
Resultado	Valor obtenido	Requisito
Tensión de Von Mises	212,72 [MPa]	215,38 [MPa]
Ciclos de vida mínimos	61037	50000
Factor de seguridad	1,0208	>1

### 5.2.1.2. Resultados del ensayo de fatiga con fuerzas verticales

Para el ensayo de fatiga con fuerzas verticales se muestra, en la Figura 5.15, los resultados de la tensión equivalente de Von Mises; en la Figura 5.16, los resultados de la vida del cuadro para dicho ensayo; y, en la Figura 5.17, el factor de seguridad a fatiga. En las figuras se muestra la localización de los valores máximos y mínimos de la medida ensayada. A continuación, en la Tabla 5.6, se comprueba el cumplimiento de los requisitos.

**E: Ensayo de fatiga con fuerzas verticales**

Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom  
Unit: Pa  
Time: 1



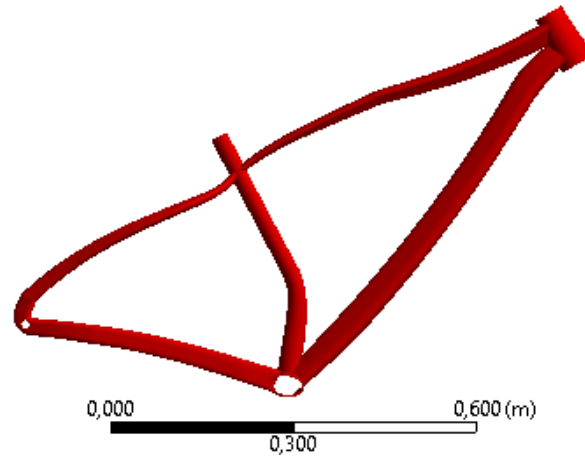
**ANSYS**  
R17.2  
Academic

Figura 5.15. Tensión equivalente de Von Mises. Ensayo con fuerzas verticales.

**E: Ensayo de fatiga con fuerzas verticales**

Life  
Type: Life  
Time: 0

1e8 Max  
1e8 Min



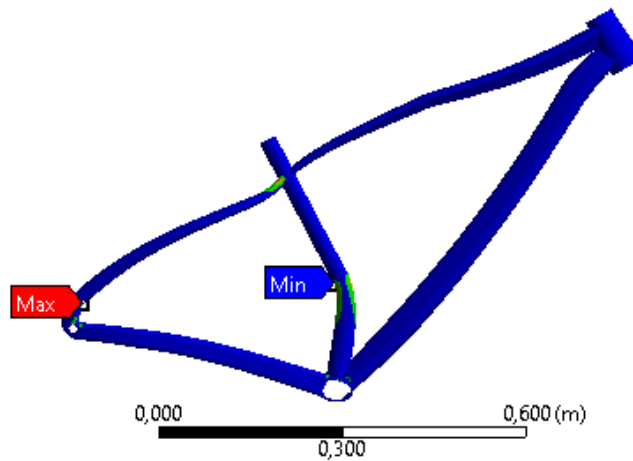
**ANSYS**  
R17.2  
Academic

Figura 5.16. Ciclos de vida. Ensayo con fuerzas verticales.

**E: Ensayo de fatiga con fuerzas verticales**

Safety Factor  
Type: Safety Factor  
Time: 0

15 Max  
10  
3,483 Min  
0



**ANSYS**  
R17.2  
Academic

Figura 5.17. Factor de seguridad a fatiga. Ensayo con fuerzas verticales.

Tabla 5.6. Verificación de requisitos. Ensayo con fuerzas verticales.

Resultado	Valor obtenido	Requisito
Tensión de Von Mises	69,257 [MPa]	215,38 [MPa]
Ciclos de vida mínimos	100000000	50000
Factor de seguridad	3,483	>1

### 5.2.1.3. Resultados del ensayo de fatiga con fuerzas de pedaleo

Con respecto al ensayo de fatiga con fuerzas de pedaleo se observa, en la Figura 5.18, los resultados de la tensión equivalente de Von Mises; en la Figura 5.19, los resultados de la vida del cuadro para dicho ensayo; y, en la Figura 5.20, el factor de seguridad a fatiga. De manera adicional, en las figuras se muestra la localización de los valores máximos y mínimos de la medida ensayada. Para asegurar el cumplimiento de los requisitos, en la Tabla 5.7 se ve la comparativa entre los resultados y los requisitos.

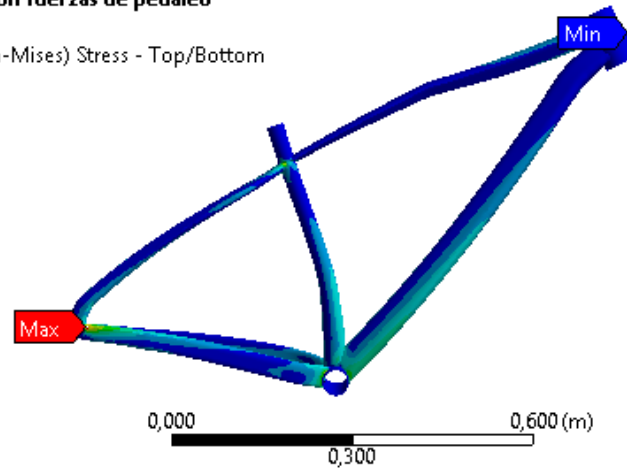
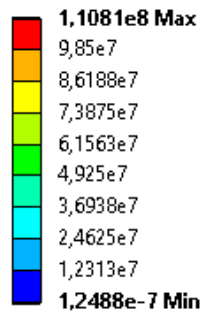
**C: Ensayo de fatiga con fuerzas de pedaleo**

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: Pa

Time: 3



**ANSYS**  
R17.2  
Academic

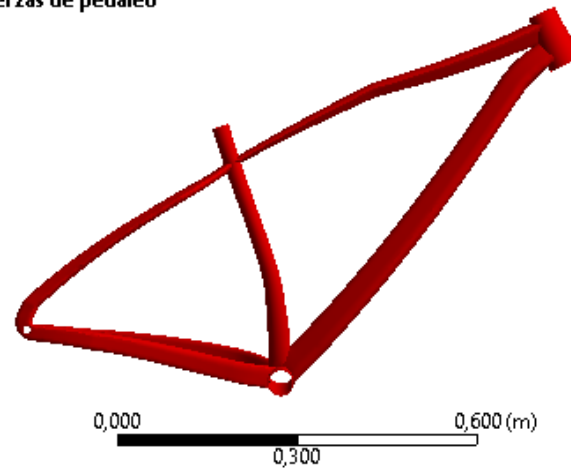
Figura 5.18. Tensión equivalente de Von Mises. Ensayo con fuerzas de pedaleo.

**C: Ensayo de fatiga con fuerzas de pedaleo**

Life

Type: Life

Time: 0



**ANSYS**  
R17.2  
Academic

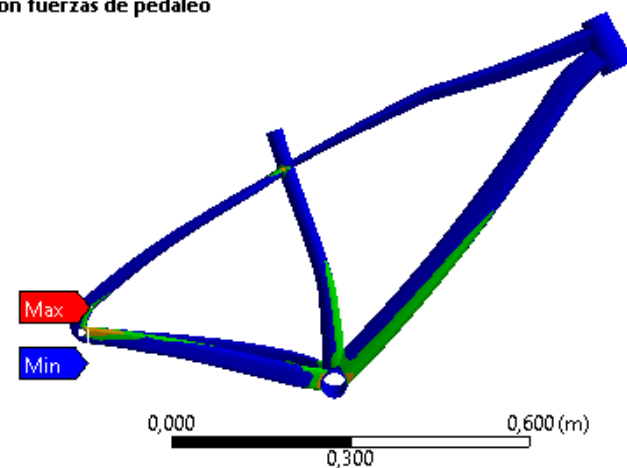
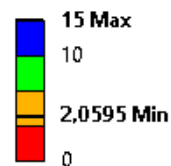
Figura 5.19. Ciclos de vida. Ensayo con fuerzas de pedaleo.

**C: Ensayo de fatiga con fuerzas de pedaleo**

Safety Factor

Type: Safety Factor

Time: 0



**ANSYS**  
R17.2  
Academic

Figura 5.20. Factor de seguridad a fatiga. Ensayo con fuerzas de pedaleo.

Tabla 5.7. Verificación de requisitos. Ensayo con fuerzas de pedaleo.

Resultado	Valor obtenido	Requisito
Tensión de Von Mises	110,81 [MPa]	215,38 [MPa]
Ciclos de vida mínimos	100000000	100000
Factor de seguridad	2,0595	>1

## 5.2.2. Modelo fabricado en monocasco de aluminio

### 5.2.2.1. Resultados del ensayo de fatiga con fuerzas horizontales

En relación al ensayo de fatiga con fuerzas horizontales se tiene, en la Figura 5.21, los resultados de la tensión equivalente de Von Mises; en la Figura 5.22, los resultados de la vida del cuadro para dicho ensayo; y, en la Figura 5.23, el factor de seguridad a fatiga. En las figuras se muestra la localización de los valores máximos y mínimos de la medida ensayada. Así mismo, en la Tabla 5.8, se comprueba el cumplimiento de los requisitos.

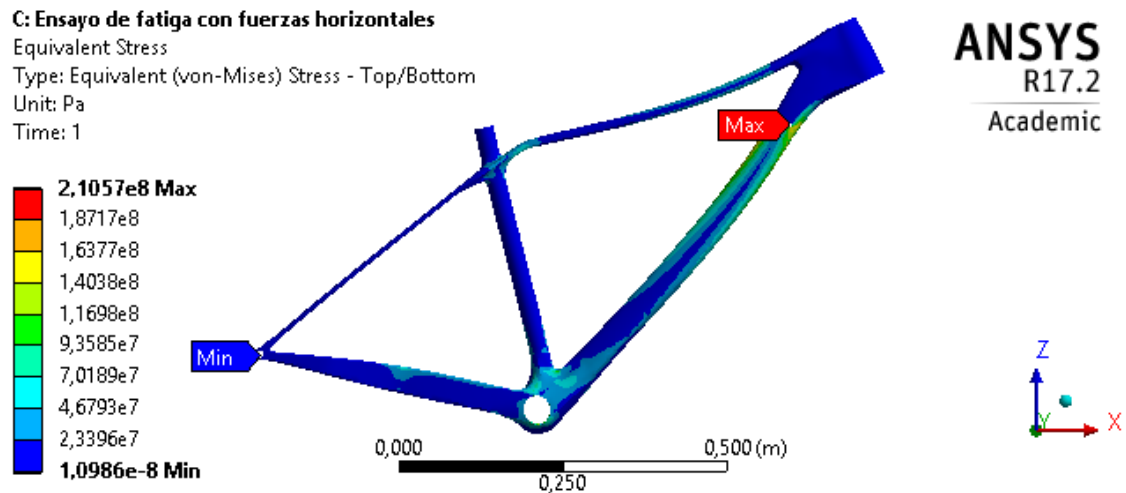
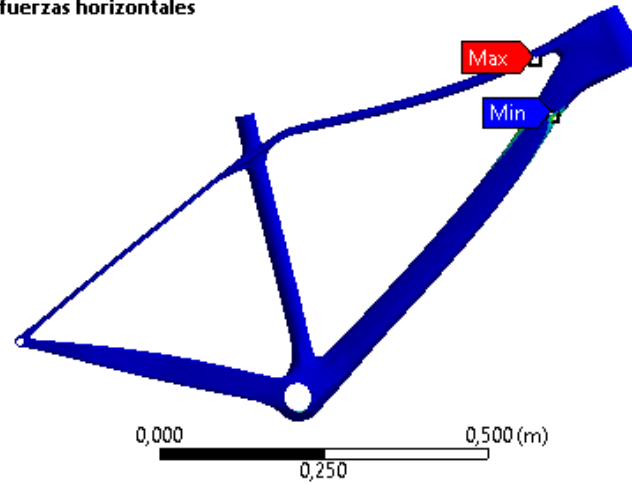
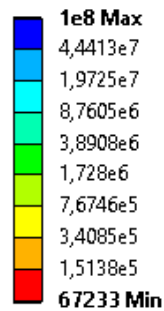


Figura 5.21. Tensión equivalente de Von Mises. Ensayo con fuerzas horizontales.

**C: Ensayo de fatiga con fuerzas horizontales**

Life  
Type: Life  
Time: 0

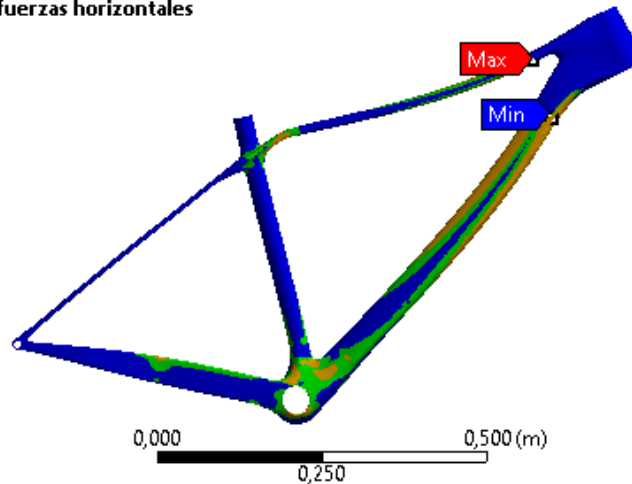
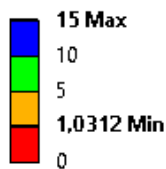


**ANSYS**  
R17.2  
Academic

Figura 5.22. Ciclos de vida. Ensayo con fuerzas horizontales.

**C: Ensayo de fatiga con fuerzas horizontales**

Safety Factor  
Type: Safety Factor  
Time: 0



**ANSYS**  
R17.2  
Academic

Figura 5.23. Factor de seguridad a fatiga. Ensayo con fuerzas horizontales.

Tabla 5.8. Verificación de requisitos. Ensayo con fuerzas horizontales.

Resultado	Valor obtenido	Requisito
Tensión de Von Mises	210,57 [MPa]	215,38 [MPa]
Ciclos de vida mínimos	67233	50000
Factor de seguridad	1,0312	>1

### 5.2.2.2. Resultados del ensayo de fatiga con fuerzas verticales

Para el ensayo de fatiga con fuerzas verticales se comprueba, en la Figura 5.24, los resultados de la tensión equivalente de Von Mises; en la Figura 5.25, los resultados de la vida del cuadro para dicho ensayo; y, en la Figura 5.26, el factor de seguridad a fatiga. En las figuras se muestra la localización de los valores máximos y mínimos de la medida ensayada. Por consiguiente, en la Tabla 5.9, se comprueba el cumplimiento de los requisitos.

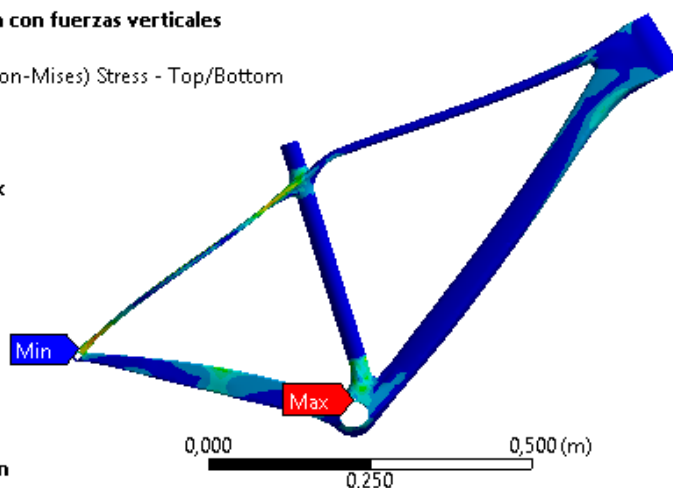
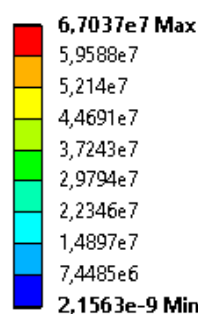
**D: Ensayo de fatiga con fuerzas verticales**

Equivalent Stress

Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: Pa

Time: 1



**ANSYS**  
R17.2  
Academic



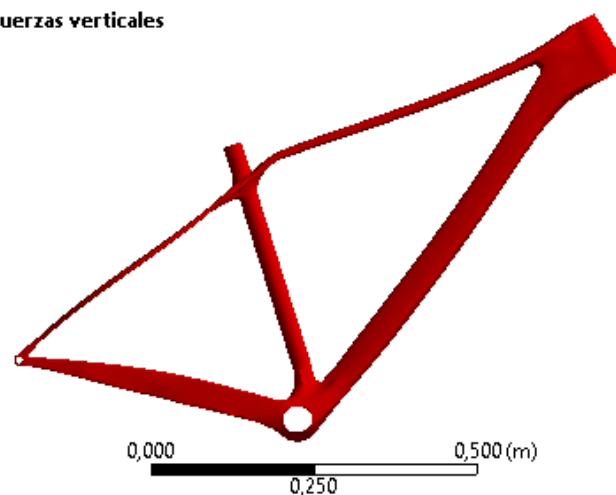
Figura 5.24. Tensión equivalente de Von Mises. Ensayo con fuerzas verticales.

**D: Ensayo de fatiga con fuerzas verticales**

Life

Type: Life

Time: 0



**ANSYS**  
R17.2  
Academic

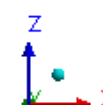


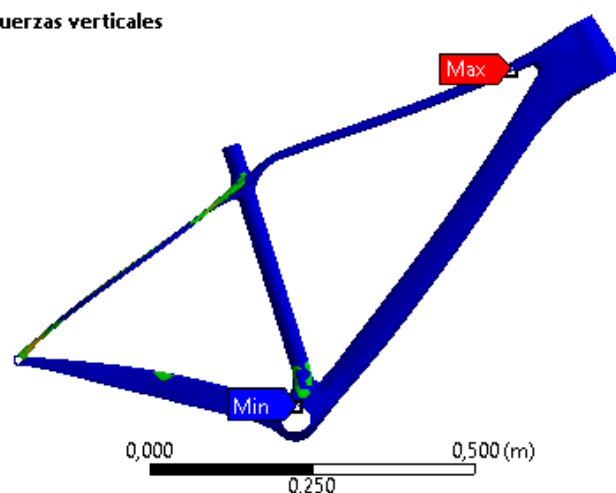
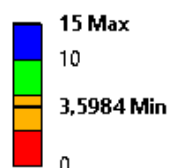
Figura 5.25. Ciclos de vida. Ensayo con fuerzas verticales.

**D: Ensayo de fatiga con fuerzas verticales**

Safety Factor

Type: Safety Factor

Time: 0



**ANSYS**  
R17.2  
Academic

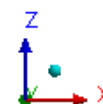


Figura 5.26. Factor de seguridad a fatiga. Ensayo con fuerzas verticales.



Tabla 5.9. Verificación de requisitos. Ensayo con fuerzas verticales.

Resultado	Valor obtenido	Requisito
Tensión de Von Mises	67,037 [MPa]	215,38 [MPa]
Ciclos de vida mínimos	100000000	50000
Factor de seguridad	3,5984	>1

5.2.2.3. Resultados del ensayo de fatiga con fuerzas de pedaleo

En cuanto al ensayo de fatiga con fuerzas de pedaleo se señala, en la Figura 5.27, los resultados de la tensión equivalente de Von Mises; en la Figura 5.28, los resultados de la vida del cuadro para dicho ensayo; y, en la Figura 5.29, el factor de seguridad a fatiga. En las figuras se muestra la localización de los valores máximos y mínimos de la medida ensayada. De igual manera, en la Tabla 5.10, se comprueba el cumplimiento de los requisitos.

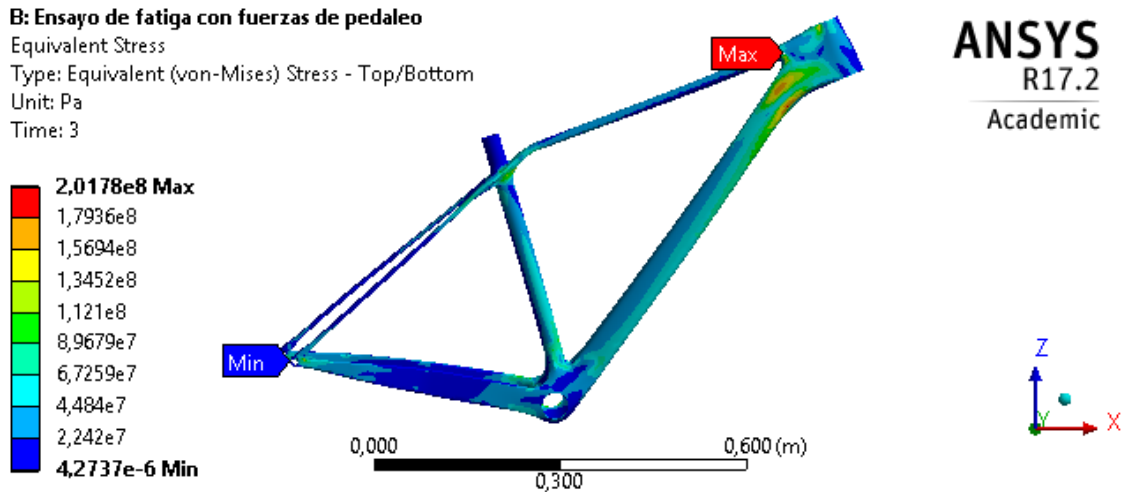


Figura 5.27. Tensión equivalente de Von Mises. Ensayo con fuerzas de pedaleo.

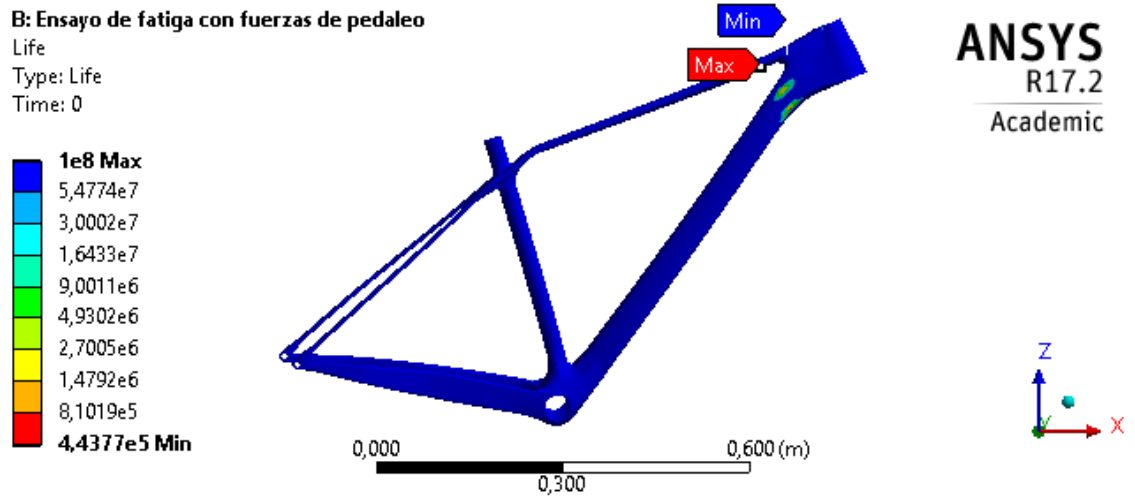


Figura 5.28. Ciclos de vida. Ensayo con fuerzas de pedaleo.

**B: Ensayo de fatiga con fuerzas de pedaleo**

Safety Factor  
Type: Safety Factor  
Time: 0

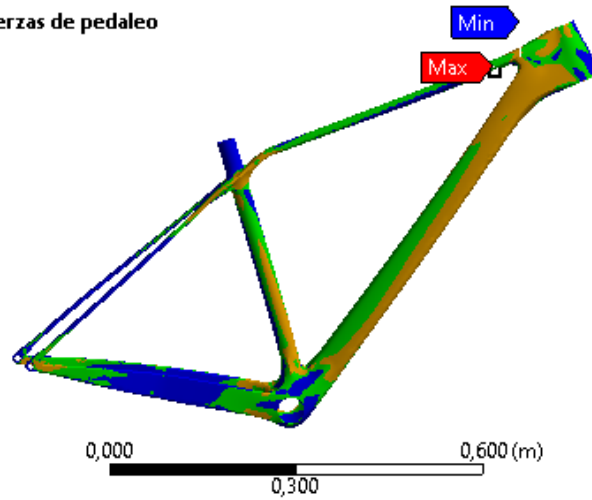
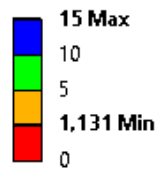


Figura 5.29. Factor de seguridad a fatiga. Ensayo con fuerzas de pedaleo.

Tabla 5.10. Verificación de requisitos. Ensayo con fuerzas de pedaleo.

Resultado	Valor obtenido	Requisito
Tensión de Von Mises	201,78 [MPa]	215,38 [MPa]
Ciclos de vida mínimos	443770	100000
Factor de seguridad	1,131	>1

## **6. COMPARACIÓN DE RESULTADOS**

---

A la luz de los resultados, se puede comprobar que el ensayo más restrictivo para ambos modelos es el ensayo a fatiga con fuerzas horizontales, seguido del ensayo con fuerzas de pedaleo, y, por último, con gran diferencia, el ensayo con fuerzas verticales.

El ensayo con fuerzas horizontales es el que limita el proceso de diseño y optimización debido a que la zona del tubo de dirección (incluyendo la parte en contacto con los tubos superior e inferior), junto con la unión vaina-tirante, son dos de las zonas más frágiles de un cuadro; y en el caso de la primera es donde se aplica la fuerza en dicho ensayo. Además, este efecto se agrava porque el espesor impuesto a los cuadros, en el software, es uniforme e idéntico para todos los tubos y todas las superficies.

Además, en el ensayo con fuerzas horizontales, la zona de máxima tensión para ambos cuadros coincide y se localiza en la zona superior del tubo inferior donde se inicia la curva hacia el tubo de dirección. Este resultado es de esperar ya que es la zona más solicitada del ensayo.

En el ensayo con fuerzas verticales, de nuevo las zonas que presentan tensiones elevadas coinciden para ambos y son la unión de los tirantes con el tubo del sillín, y la zona correspondiente al extremo inferior de la tija que se utilizaría para dicho ensayo. Este ensayo es el que más se aleja de los requisitos, del lado de la seguridad, porque la unión tirantes-tubo sillín-tubo superior forma un conjunto de gran rigidez por la disposición de las uniones. Esto es así para asegurar la máxima rigidez entre el sillín y la caja de pedalier y evitar que se pierda el mínimo rendimiento posible en la pedalada.

Sin embargo, en el caso del ensayo con fuerzas de pedaleo, la máxima tensión en el cuadro de tubos se localiza en la unión tirante-vaina, y en el monocasco, en la zona superior del tubo inferior. Mostrando que el de tubos es más débil que el monocasco, ante el esfuerzo torsor que genera el ensayo en las vainas.

Por otro lado, se observa que, para lograr alcanzar los requisitos de los ensayos, se necesita un cuadro más pesado en el caso de tubos soldados frente al monocasco. En concreto, el cuadro monocasco es un 34,6% más ligero que el de tubos. Esto se debe a que en el caso del modelo de tubos el principal problema son las uniones, que son las zonas donde se concentran tensiones elevadas; problema que no presenta el monocasco ya que sus uniones son suaves y sin aristas, permitiendo repartir dichas tensiones, con lo que se consigue un cuadro más ligero.

## 7. PRESUPUESTO

### 7.1. Presupuesto de elaboración del proyecto

Tabla 7.1. Presupuesto de elaboración del proyecto.

RECURSOS	CONSUMO	COSTE	TOTAL
<b>Hardware</b>			
Equipo informático	100%	800,00 €	800,00 €
<b>Software<sup>1</sup></b>			
Licencia ANSYS	150 horas	8400,00 €	656,25 €
Licencia Solid Edge ST9	200 horas	1500,00 €	156,25 €
Licencia Office	100 horas	69,00 €	3,59 €
<b>Normas</b>			
UNE EN ISO 15532	100%	64,00 €	64,00 €
UNE EN ISO 4210-1	100%	42,00 €	42,00 €
UNE EN ISO 4210-2	100%	57,00 €	57,00 €
UNE EN ISO 4210-3	100%	45,00 €	45,00 €
UNE EN ISO 4210-6	100%	52,00 €	52,00 €
<b>Total de material</b>			1876,09 €
<b>Personal<sup>2</sup></b>			
Horas de trabajo	450	10,00 €/h	4500,00 €
<b>Total</b>			6376,09 €

<sup>1</sup> Puesto que las licencias de software son anuales, se han promediado las horas de utilización en el proyecto teniendo en cuenta una utilización de 1920 horas al año por licencia.

<sup>2</sup> El precio por hora considerado para el proyecto ha sido el coste de un ingeniero junior en base a los datos proporcionados en otros proyectos de carácter académico.

## **8. CONCLUSIONES**

---

Al término del proyecto, queda reflejado que la metodología de diseño y análisis es la correcta para la consecución del objetivo principal: diseño de dos cuadros geoméricamente semejantes, pero con características distintas en cuanto al método de fabricación; y, análisis de dichos modelos en base a la normativa adecuada.

Se ha logrado que ambos cuadros cumplan los requisitos de la normativa por lo que serían aptos para su fabricación.

Ambos cuadros presentan resultados prácticamente idénticos en cuanto a los valores de tensión equivalente de Von Mises, vida del elemento y factor de seguridad a fatiga; en los ensayos de fatiga con fuerzas horizontales y verticales. Sin embargo, en el ensayo de fatiga con fuerzas de pedaleo, el cuadro monocasco se aproxima más a los requisitos debido a que presenta una mayor esbeltez en sus tubos (de igual longitud que en el modelo de tubos soldados, pero con una sección transversal inferior).

La principal diferencia entre ambos modelos es el peso: 2,0242 kg para el modelo de tubos soldados y 1,3239 kg para el monocasco, lo que representa que este último es un 34,6% más ligero que el primero.

En cuanto al objetivo parcial último del proyecto, que es la comparativa de los diseños con otros modelos existentes, se ha comprobado que únicamente el modelo monocasco podría competir con ellos en cuanto a peso del cuadro. Este modelo presenta un peso menor que los datos proporcionados por las marcas de sus modelos de aluminio. Por ejemplo, en comparación con el modelo Canyon Grand Canyon, el diseño monocasco es un 18,3% más ligero; y con el modelo Scott Scale 945, un 10% más ligero.

Sin embargo, el modelo de tubos soldados no podría competir con los modelos ya que supera en torno a medio kilogramo el peso de los mismos. No obstante, a pesar de que el cuadro modelado con tubos de aluminio soldados no es apto para el sector más competitivo de la industria, su peso se encuentra por debajo del de los modelos de gama baja que suelen alcanzar los 3 kilogramos. Por lo que se podría introducir el modelo en la gama media-baja de la industria.

## **9. TRABAJOS FUTUROS**

---

Finalizado el proyecto, si se realiza un análisis de la propuesta del mismo, se pueden encontrar áreas de trabajo para futuros proyectos o análisis, con el fin de optimizar los modelos o abrir nuevas vías de investigación sobre el proyecto.

En primer lugar, se podría someter a los modelos a nuevos métodos de análisis como ensayos de impacto dinámicos, o ensayos de vibraciones. De esta forma se obtendrían más datos sobre el comportamiento de los modelos ante diferentes solicitaciones.

En segundo lugar, sería recomendable estudiar nuevos materiales, o materiales ya existentes pero que no han sido contemplados en la elaboración de los modelos, como puedan ser los compuestos de fibra de carbono o la inclusión del grafeno. Será necesario, en el caso de los materiales compuestos mediante fibras, estudiar los laminados y su posición en cada zona del cuadro para asegurar el mejor comportamiento estructural.

Por último, se podrían considerar los métodos de diseño y análisis expuestos en el proyecto para realizar otros modelos de bicicletas como bicicletas de doble suspensión o bicicletas eléctricas. Puesto que las bicicletas eléctricas están suponiendo una renovación importante en el mercado del ciclismo. Para ello se deberían realizar algunas modificaciones en los procesos de análisis, que se recogen en la misma normativa utilizada en el proyecto (en el caso de las bicicletas de doble suspensión).

## 10. REFERENCIAS

---

- [1] AMBE Asociación de Marcas y Bicicletas de España, "El sector de la bicicleta en cifras 2016" 2016. [En línea]. Disponible en: <http://asociacionambe.es/wp-content/uploads/2014/12/Presentaci%C3%B3n-Nota-de-Prensa-2016-1.pdf>. [Último acceso: Septiembre 2017].
- [2] SPECIALIZED, *SPECIALIZED*, [En línea]. Disponible en: <https://www.specialized.com/es/es/men/bikes/mountain/cross-country/epic-hardtail-pro-carbon-wold-cup/115326>. [Último acceso: Noviembre 2016].
- [3] SPECIALIZED, *SPECIALIZED*, [En línea]. Disponible en: <https://www.specialized.com/es/es/men/bikes/mountain/sworks-demo-8/128925>. [Último acceso: Noviembre 2016].
- [4] BICI HOME, "La historia de la bicicleta", 25 Junio 2013. [En línea]. Disponible en: <http://bicihome.com/la-historia-de-las-bicicleta/>. [Último acceso: Noviembre 2016].
- [5] S. Bender, "What is bicycle? When was Bicycle formed?", *bike blog or die*, 18 Diciembre 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.bikeblogordie.com/2014/12/what-is-bicycle-when-was-bicycle-formed.html>. [Último acceso: Noviembre 2016].
- [6] M. Gasch, "Jhon Finley Scott ¿el (verdadero) inventor del MTB?", 10 Julio 2015. [En línea]. Disponible en: <https://solobici.es/john-finley-scott-el-verdadero-inventor-del-mtb/>. [Último acceso: Noviembre 2016].
- [7] M. Gasch, "Joe Breeze el primer visionario del MTB", *Solobici*, 16 Enero 2015. [En línea]. Disponible en: <https://solobici.es/joe-breeze-el-primer-visionario-del-mtb/>. [Último acceso: Noviembre 2016].
- [8] M. Á. Galán, "Revoluciones del MTB. Los sistemas de suspensión", *MTB PRO magazine*, 29 Febrero 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.mtbpro.es/afondo/revoluciones-del-mtb-ii-los-sistemas-de-suspension>. [Último acceso: Noviembre 2016].
- [9] DASSI BIKES, *DASSI*, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://dassi.com/dassi-innovation/graphene>. [Último acceso: Noviembre 2016].
- [10] J. Langley, "What's What on a bicycle", *Jimlangley.net*, [En línea]. Disponible en: <http://www.jimlangley.net/wrench/bicycleparts.html>. [Último acceso: Noviembre 2016].
- [11] BMC, *BMC Switzerland*, [En línea]. Disponible en: <https://www.bmc-switzerland.com/sp-es/bicis/montana/>. [Último acceso: Noviembre 2016].
- [12] Park Tool, "Standardized Headset Identification System", *Park Tool*, 26 Agosto 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.parktool.com/blog/repair>

- help/standardized-headset-identification-system. [Último acceso: Diciembre 2016].
- [13] Chain Reaction Cycles, *Chain Reaction Cycles*, [En línea]. Disponible en: <http://www.chainreactioncycles.com/es/es/direccion-fsa-orbit-1-5-zs-1-1-8/rp-prod80065>. [Último acceso: Diciembre 2016].
- [14] A. Valero, "Cómo elegir una potencia para bicicleta", *Biciclinik*, 8 Abril 2016. [En línea]. Disponible en: <https://bicilink.com/blog-ciclismo/como-elegir-una-potencia-para-bicicleta/>. [Último acceso: Noviembre 2016].
- [15] Cofidis Likes Ciclismo, "Modalidades y tipos de bicis", *Cofidis Likes Ciclismo*, 11 Marzo 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.cofidislikesciclismo.com/mtb-modalidades-y-tipos-de-bicis/>. [Último acceso: Diciembre 2016].
- [16] Mondraker, *Mondraker*, [En línea]. Disponible en: <http://www.mondraker.com/es/en/2017-summum-carbon-pro-team>. [Último acceso: Diciembre 2016].
- [17] Niner, *Niner Bikes*, [En línea]. Disponible en: <http://www.ninerbikes.com/RIP-9-RDO-5-STAR-X01-EAGLE-ENVE-29>. [Último acceso: Diciembre 2016].
- [18] Cannondale, *Cannondale*, 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.ninerbikes.com/RIP-9-RDO-5-STAR-X01-EAGLE-ENVE-29>. [Último acceso: Diciembre 2016].
- [19] Scott, *Scott Sports*, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.scott-sports.com/es/es/products/249536008/Bicicleta-Spark-RC-900-SL-SCOTT>. [Último acceso: Diciembre 2016].
- [20] Nosinmibici, "El juego de dirección: sistemas y estándares", *Nosinmibici*, 22 Junio 2016. [En línea]. Disponible en: <https://nosinmibici.com/2016/07/22/el-juego-de-direccion-sistemas-y-estandares/>. [Último acceso: Febrero 2017].
- [21] Nosinmibici, "Tipos de pedalier de bicicleta", *Nosinmibici*, 15 Junio 2016. [En línea]. Disponible en: <https://nosinmibici.com/2016/06/15/tipos-de-pedalier-de-bicicleta/>. [Último acceso: Febrero 2017].
- [22] El equipo de EMEB, "Cajas de pedalier tipos y medidas", *Escuela EMEB*, 23 Diciembre 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.emeb.es/cajas-de-pedalier-tipos-y-medidas/>. [Último acceso: Febrero 2017].
- [23] Material ciclista, "Eje de pedalier entender los estándares", *Material ciclista*, 31 Enero 2014. [En línea]. Disponible en: <https://material-ciclista.es/p/eje-de-pedalier-entender-los-estandares/>. [Último acceso: Febrero 2017].
- [24] Bicimax, *Bicimax*, 12 Abril 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.bicimax.es/noticias-producto/ejes-boost>. [Último acceso: Febrero 2017].
- [25] Revista Bikes World, "Desgranando la rueda: 4 tipos de ejes", *Bikes World*, 5 Septiembre 2016. [En línea]. Disponible en:



- <http://www.bikesworldrevista.es/desgranando-la-rueda-4-tipos-de-ejes/>. [Último acceso: Febrero 2017].
- [26] El equipo de EMEB, "Ejes de ruedas tipos y medidas", *Escuela EMEB*, 17 Enero 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.emeb.es/ejes-de-ruedas-tipos-y-medidas/>. [Último acceso: Febrero 2017].
- [27] Mountainbike, "Qué tipo de desviador tienes", *Bici-Fácil*, 13 Febrero 2009. [En línea]. Disponible en: <http://www.mountainbike.es/bici-facil/repara-y-ajusta/articulo/que-tipo-de-desviador-tienes>. [Último acceso: Febrero 2017].
- [28] Ciclismoafondo.es, "Material cuadro de bicicleta", *Ciclismo a fondo*, 11 Noviembre 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.ciclismoafondo.es/mecanica/Informes/articulo/material-cuadro-bicicleta>. [Último acceso: Febrero 2017].
- [29] D. R. Askeland, *Ciencia e ingeniería de los materiales* 3ª edición, International Thomson Editores, S.A., 1998.
- [30] W. D. Callister, *Introducción a la Ciencia e ingeniería de los materiales*, Editorial Reverté S.A., 1995.
- [31] Ciclosfera, "Fabrican el primer cuadro de titanio de bicicleta en una impresora 3D", *Ciclosfera*, 12 Febrero 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.ciclosfera.com/fabrican-el-primer-cuadro-de-titanio-de-bicicleta-en-una-impresora-3d/>. [Último acceso: Febrero 2017].
- [32] C. Piedrabuena, "El primer cuadro de bicicleta impreso en 3D", *Solobici*, 11 Febrero 2014. [En línea]. Disponible en: <https://solobici.es/el-primer-cuadro-de-titanio-impreso-en-3d/>. [Último acceso: Febrero 2017].
- [33] S. Kalpakjian y S. R. Schmid, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología* 5ª Edición, Pearson Prentice Hall, 2002.
- [34] H. P. Rubio, "Materiales en la fabricación de cuadros mtb aleaciones parte III", *El blog de nbici.es*, 23 Junio 2014. [En línea]. Disponible en: <http://blog.nbici.es/2014/06/23/materiales-en-la-fabricacion-de-cuadros-mtb-aleaciones-parte-iiib/>. [Último acceso: Febrero 2017].
- [35] Fibra de carbono, "Tipos de fibra de carbono", *Fibra de carbono.es*, 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.fibradecarbono.es/articulos/tipos-de-fibra-de-carbono/>. [Último acceso: Marzo 2017].
- [36] Racormance, *Racormance composites bikes*, 2016. [En línea]. Disponible en: [http://www.racormance.com/about\\_us\\_es/](http://www.racormance.com/about_us_es/). [Último acceso: Febrero 2017].
- [37] Mountainbike.es, "Los secretos del aluminio", *Bici-Fácil*, 27 Marzo 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.mountainbike.es/bici-facil/repara-y-ajusta/articulo/los-secretos-del-aluminio>. [Último acceso: Marzo 2017].
- [38] F. Oharriz, "Hidroconformado", *Slide Share*, 16 Febrero 2014. [En línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/fernandooharriz/hydroforming-applications-optimus-consulting-vitoria-sl>. [Último acceso: Marzo 2017].

- [39] Scott carbon experts, *Scott sports*, [En línea]. Disponible en: <http://carbonexperts.scott-sports.com/es/index.html>. [Último acceso: Marzo 2017].
- [40] Ciclismoafondo.es, "Fibra de carbono", *Ciclismo a fondo*, 14 Agosto 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.ciclismoafondo.es/mecanica/Informes/articulo/fibra-carbono>. [Último acceso: Marzo 2017].
- [41] Mizar, "Fabricación aditiva con metales: aplicaciones y tecnológicas", *Mizar*, 2 Marzo 2017. [En línea]. Disponible en: <http://mizaradditive.com/fabricacion-aditiva-metales-aplicaciones-tecnologias/>. [Último acceso: Marzo 2017].
- [42] Bicicletas. Terminología, *UNE EN 15532*, 2009.
- [43] Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Términos y definiciones, *UNE EN ISO 4210-1*, 2014.
- [44] Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Requisitos para bicicletas de paseo, para adultos jóvenes, de montaña y de carreras, *UNE EN ISO 4210-2*, 2015.
- [45] Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Métodos de ensayo comunes, *UNE EN ISO 4210-3*, 2014.
- [46] Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Métodos de ensayo de frenado, *UNE EN ISO 4210-4*, 2014.
- [47] Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Métodos de ensayo de dirección, *UNE EN ISO 4210-5*, 2014.
- [48] Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Métodos de ensayo del cuadro y la horquilla, *UNE EN ISO 4210-6*, 2015.
- [49] Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Métodos de ensayo para ruedas y llantas, *UNE EN ISO 4210-7*, 2014.
- [50] Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Métodos de ensayo para los pedales y el sistema de transmisión, *UNE EN ISO 4210-8*, 2014.
- [51] Ciclos. Requisitos de seguridad para bicicletas. Métodos de ensayo para los sillines y las tijas, *UNE EN ISO 4210-9*.
- [52] Definiciones de las medidas básicas del cuerpo humano para el diseño tecnológico. Definiciones de las medidas del cuerpo y referencias, *UNE EN ISO 7250-1*, 2010.
- [53] Todo Mountainbike, "El ángulo de dirección", *Todomountainbike*, 2 Junio 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.todomountainbike.net/art/nociones-basicas-sobre-la-geometria-de-una-bicicleta-el-angulo-de-direccion>. [Último acceso: Abril 2017].

- [54] Todo Mountainbike, "El ángulo del tubo del sillín", *Todomountainbike*, 10 Junio 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.todomountainbike.net/art/nociones-basicas-sobre-la-geometria-de-una-bicicleta-el-angulo-del-tubo-del-sillin>. [Último acceso: Abril 2017].
- [55] Todo Mountainbike, "La longitud de las vainas", *Todomountainbike*, 17 Junio 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.todomountainbike.net/art/nociones-basicas-sobre-la-geometria-de-una-bicicleta-la-longitud-de-las-vainas>. [Último acceso: Abril 2017].
- [56] Todo Mountainbike, "El reach", *Todomountainbike*, 14 Julio 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.todomountainbike.net/art/nociones-basicas-sobre-la-geometria-de-una-bicicleta-el-reach>. [Último acceso: Abril 2017].
- [57] Todo Mountainbike, "El stack", *Todomountainbike*, 14 Octubre 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.todomountainbike.net/art/nociones-basicas-sobre-la-geometria-de-una-bicicleta-el-stack>. [Último acceso: Abril 2017].
- [58] Todo Mountainbike, "La altura del eje de pedalier", *Todomountainbike*, 10 Marzo 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.todomountainbike.net/art/nociones-basicas-sobre-la-geometria-de-una-bicicleta-la-altura-del-eje-de-pedalier>. [Último acceso: Abril 2017].
- [59] Todo Mountainbike, "La distancia entre ejes o batalla", *Todomountainbike*, 20 Febrero 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.todomountainbike.net/art/nociones-basicas-sobre-la-geometria-de-una-bicicleta-la-distancia-entre-ejes-o-batalla>. [Último acceso: Abril 2017].
- [60] Todo Mountainbike, "El offset y el trail de la horquilla", *Todomountainbike*, 11 Noviembre 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.todomountainbike.net/art/nociones-basicas-sobre-la-geometria-de-una-bicicleta-el-offset-y-trail-de-la-horquilla>. [Último acceso: Abril 2017].
- [61] Iberisa, "Fatiga", *Iberisa.com*, 2001. [En línea]. Disponible en: <http://www.iberisa.com/soporte/fatiga/intro.htm>. [Último acceso: Abril 2017].
- [62] L. J. R. Medina, "Fatiga de aleaciones de aluminio aeronáutico con nuevos tipos de anodizado de bajo impacto ambiental y varios espesores de recubrimiento", Junio 2010. [En línea]. Disponible en: [http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/7323/RamirezMedina\\_LeidyJane\\_th\\_TD.pdf;jsessionid=0920EBB9CA4817B28E0EE313E0527E20?sequence=2](http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/7323/RamirezMedina_LeidyJane_th_TD.pdf;jsessionid=0920EBB9CA4817B28E0EE313E0527E20?sequence=2). [Último acceso: Abril 2017].